

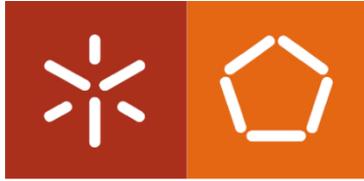


Diogo Carneiro Guerreiro

Processamento e caracterização de uma peça automóvel processado
com tecnologia Mucell Vs injeção convencional

Universidade do Minho
Escola de Engenharia





Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Diogo Carneiro Guerreiro

**Processamento e caracterização de uma peça
automóvel processado com tecnologia Mucell Vs
Injeção convencional**

Dissertação de Mestrado

Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao Grau de Mestre
em Engenharia de Polímeros

Trabalho efetuado sob a orientação de:

Professor Doutor António José Vilela Pontes

Engenheiro João Marques

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS



Atribuição-NãoComercial-SemDerivações
CC BY-NC-ND

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Agradecimentos

Ao meu orientador, Professor Doutor António José Vilela Pontes por me auxiliar sempre que foi necessário e pela constante atenção na orientação da dissertação.

Um agradecimento especial á MICROplásticos por me ter acolhido ao longo do estágio curricular e por todo o apoio disponibilizado.

Agradecer aos meus pais que sempre me apoiarem e aos meus amigos do curso que sempre me auxiliar nas dúvidas e pela compreensão e incentivo, para a realização deste trabalho.

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

Processamento e caracterização de uma peça automóvel processada com tecnologia *MuCell* Vs Injeção convencional

Resumo

A indústria automóvel é marcada pela elevada competitividade e exigência na qualidade dos produtos. Estas empresas procuram métodos que lhes permitam reduzir custos, melhorar a qualidade dos produtos e a satisfação do cliente.

As peças processadas por injeção com recurso a tecnologia *MuCell* possuem aplicações importantes para as diferentes áreas industriais. O uso da tecnologia *MuCell* permite utilizar diferentes materiais plásticos na produção de peças e apresenta várias vantagens como: redução do peso da peça e diminuição do tempo de ciclo, o que resulta na economia de custos e obtenção de peças mais complexas com design inovador.

Este estudo decorreu em ambiente industrial na empresa MicroPlásticos. No presente estudo foram utilizados dois materiais, o Polipropileno (PP) e o poli (tereftalato de butileno) (PBT) com o objetivo de comparar a nível físico e mecânico peças processadas com injeção convencional e peças processadas com á recurso á tecnologia *MuCell* injetando diferente percentagens de Azoto.

Ao longo do estudo verificou-se a influência da injeção de gás (Azoto), quer no tempo de ciclo de injeção, na contração e peso da peça, na resistência mecânica, bem como na observação do gás no núcleo das peças. Observou-se uma diminuição natural do peso das peças, bem como nas das propriedades mecânicas que é influenciada pelo aumento das diferentes percentagens de gás.

Palavras-chave: Tecnologia *MuCell*; Injeção a gás; Contração; Tempo de ciclo; Resistência mecânica

Processamento e caracterização de uma peça automóvel processada com tecnologia *MuCell Vs Injeção convencional*

Abstract

The automotive industry is marked by high competitiveness and demand in the product quality. These companies search for methods that allow the reduction of costs, product quality improvement and client satisfaction.

The parts processed by injection using MuCell technology have important applications for different industry areas. MuCell technology allows the use of different plastic materials in manufacture and has several advantages such as weight reduction and decreased cycle time, this results in cost savings and the ability of acquire more complex parts with innovative design.

This study used Polypropylene (PP) and Polybutylene Terephthalate (PBT) to compare, at a physical and mechanical level, a part processed by injection using MuCell technology and conventional injection (without MuCell).

Using MuCell technology, the material is processed with different percentages to assess the influence of the gas injection.

Throughout the study it was evaluated the influence of gas injection (Nitrogen) whether on injection cycle time, mechanical resistance, shrinkage, and weight of the parts, and it was also observed the gas in the core of the parts.

There was a natural decrease in the parts weight as well as in the mechanical properties due to the addition of different percentages of gas

Keywords: MuCell Technology; Gas injection; Contraction; Cycle time; Mechanical resistance

ÍNDICE

| | |
|---|-----|
| Agradecimentos..... | ii |
| Resumo..... | iv |
| Abstract..... | v |
| Lista de Abreviaturas e Siglas | ix |
| Índice de Figuras..... | x |
| Índice de Tabelas | xii |
| CAPÍTULO 1 - Introdução..... | 1 |
| 1.1. Empresa..... | 1 |
| 1.2. Enquadramento | 1 |
| 1.3. Objetivos..... | 2 |
| 1.4. Estrutura da Dissertação | 2 |
| Capítulo 2- Conceitos teóricos..... | 3 |
| 2.1. Introdução..... | 3 |
| 2.1. Ciclo de moldação por injeção | 4 |
| 2.2. Espumas celulares | 5 |
| 2.3. Agente expensor..... | 6 |
| 2.4. Conceitos básicos sobre a formação de uma espuma..... | 7 |
| 2.5. Técnica de <i>Mucell</i> | 10 |
| 2.5.1. Unidade de injeção..... | 10 |
| 2.5.2. Fases de injeção..... | 12 |
| 2.6. Caracteres do processo de moldação por injeção de espuma microcelular- Processo <i>Mucell</i> .. | 15 |
| 2.6.1. Viscosidade do fundido | 15 |
| 2.6.2. Tempo de ciclo de injeção | 16 |
| 2.6.3. Peso da peça | 16 |
| 2.6.4. Propriedade mecânicas da peça | 16 |

| | | |
|---|---|----|
| 2.6.5. | Qualidade superficial | 17 |
| 2.7. | O efeito do <i>design</i> do molde na morfologia porosa dos polímeros produzidos com a tecnologia <i>MuCell</i> | 18 |
| 2.8. | Vantagens VS Desvantagens do processo <i>MuCell</i> | 21 |
| 2.8.1. | Vantagens | 21 |
| 2.8.2. | Desvantagens..... | 23 |
| 2.9. | Aplicações industriais | 24 |
| CAPÍTULO 3 – Procedimentos experimentais | | 26 |
| 3.1. | Materiais em estudo | 26 |
| 3.1.1. | PBT | 26 |
| 3.1.2. | PP | 26 |
| 3.2. | Processamento de peças por injeção com recurso à tecnologia <i>Mucell Vs Sem Mucell</i> | 28 |
| 3.3. | Medição da contração da peça em dois pontos | 32 |
| 3.4. | Preparação dos provetes | 33 |
| 3.5. | Ensaio Mecânicos..... | 34 |
| 3.6. | Visualização das bolhas | 37 |
| CAPÍTULO 4 – Resultados e análise de resultados | | 39 |
| 4.1. | Comparação injeção com <i>Mucell</i> e injeção convencional..... | 39 |
| 4.1.1. | Caso PP | 39 |
| 4.1.2. | Caso PBT | 41 |
| 4.2. | Análise da contração com <i>Mucell</i> e sem <i>Mucell</i> | 43 |
| 4.3. | Ensaio mecânico de flexão em 3 pontos | 47 |
| 4.4. | Formação das bolhas de gás | 53 |
| 4.5. | Peso da peça Vs Contração | 59 |
| CAPÍTULO 5 - Conclusão | | 63 |
| Referências Bibliográficas | | 64 |

Anexo 1. Tabelas com os valores da contração..... 67

Lista de Abreviaturas e Siglas

| | |
|------------------|--------------------------------|
| PP | Polipropileno |
| PBT | Poli (tereftalato de butileno) |
| O ₂ | Oxigénio |
| N ₂ | Azoto |
| CO ₂ | Dióxido de Carbono |
| AEF | Agentes Físicos |
| AEQ | Agentes Químicos |
| SCF | Fluido Super critico |
| % | Percentagem |
| SG | Sem gás |
| PC | Pressão Crítica |
| TC | Temperatura Crítica |
| TPU | Poliuretano |
| SG | Sem Gás |
| <i>C/ Mucell</i> | <i>Com Mucell</i> |
| <i>S/ Mucell</i> | <i>Sem Mucell</i> |

Índice de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1- MICROplásticos | 1 |
| Figura 2- Ciclo de moldação [2]..... | 4 |
| Figura 3- Esquema da estrutura: a) Espuma de célula aberta; e b) Espuma de célula fechada[9]. | 6 |
| Figura 4- Diagrama de fases do fluido no estado crítico[14]..... | 8 |
| Figura 5- Etapas iniciais da formação de espumas antes de o material entra no molde[15]. | 9 |
| Figura 6- Controlador do fluxo SCF | 10 |
| Figura 7- Módulo de injeção próprio do MuCell [17]..... | 11 |
| Figura 8- regulador automático de pressão operacional[17]..... | 11 |
| Figura 9- Injetor do fluxo SCF[17]..... | 11 |
| Figura 10- Diferentes fases ocorridas no fuso[19]. | 12 |
| Figura 11- Unidade de injeção de Mucell®[19] | 14 |
| Figura 12- Efeito do SCF na viscosidade do fundido[16]. | 15 |
| Figura 13- Ensaio mecânico (resistência à flexão, tração e impacto do material PBT(30% GF))[16]. | 17 |
| Figura 14- Defeitos superficiais de peças resultante do processo MuCell, (a) marcas de remoinhos; (b) e (b1) riscos prateados; (c) e (c1) bolhas[16]. | 18 |
| Figura 15- Desenhos técnicos dos implantes[16]..... | 19 |
| Figura 16- Diferença da estrutura porosa do molde B e do molde A, a uma velocidade de injeção de 300(mm/s)[16]. | 19 |
| Figura 17- Diâmetro dos poros versus velocidade de injeção[16]. | 20 |
| Figura 18- Diferença do tamanho dos poros versus velocidade de injeção[16]. | 20 |
| Figura 19- Diferença entre porosidade versus diferentes parâmetros[16]. | 21 |
| Figura 20- Diferença do tamanho dos poros versus diferentes parâmetros do processo[16]. | 21 |
| Figura 21- Redução nas Diferentes etapas do processo[19]. | 23 |
| Figura 22- Máquina de injeção..... | 28 |
| Figura 23- CNN (Máquina de medição de coordenadas. | 32 |
| Figura 24- Valores das dimensões dos dois pontos, com o auxílio do software Creo view 6.0 | 32 |
| Figura 25- Desenho dos provetes na peça em estudo | 33 |
| Figura 26- Identificação e corte dos provetes..... | 34 |
| Figura 27- Máquina usada no ensaio de flexão em três pontos | 34 |
| Figura 28- Representação esquemática da deflexão em 3 pontos[18]. | 35 |
| Figura 29- Gráfico do módulo de elasticidade retirado de cada provete testado | 36 |
| Figura 30- Comparação do módulo de elasticidade do PBT BRANCO provete A..... | 36 |
| Figura 31- Máquina CMM multisensor zeiss o-inspect 322 | 37 |
| Figura 32- Área analisada para observação das bolhas de gás | 37 |
| Figura 33- Sequência e Observação das bolhas tendo em conta a % de gás incorporada. | 38 |
| Figura 34- Peça em estudo do ramo automóvel: d1) peça em PBT Laranja; d2) peça em PBT Branco; d3) peça em PP Preto. | 39 |
| Figura 35- Esquema representativo do tempo economizado quando usada a tecnologia Mucell | 41 |
| Figura 36- Esquema representativo do tempo economizado quando usada a tecnologia Mucell..... | 42 |
| Figura 37- Medição real no molde dos dois pontos escolhidos para avaliar a contração. | 43 |
| Figura 38- Orientação dos provetes em estudo..... | 48 |
| Figura 39- Comparação do módulo de elasticidade do PBT BRANCO provete A..... | 48 |
| Figura 40- Comparação do módulo de elasticidade do PBT BRANCO provete B..... | 49 |
| Figura 41- Comparação do módulo de elasticidade do PBT LARANJA provete A | 50 |
| Figura 42- Comparação do módulo de elasticidade do PBT LARANJA provete B | 50 |

| | |
|--|----|
| Figura 43- Comparação do modulo de elasticidade do PP provete A..... | 51 |
| Figura 44- Comparação do modulo de elasticidade do PP provete B..... | 52 |
| Figura 45- Recorte da secção de uma amostra processada por injeção com recurso á tecnologia MuCell | 53 |
| Figura 46- Fotos relativas às superfícies dos provetes de PBT Branco das diferentes variáveis em estudo Sem Mucell e com Mucell (7%, 8% e 10%)..... | 54 |
| Figura 47- Fotos relativas às superfícies dos provetes de PBT Laranjos das diferentes variáveis em estudo Sem Mucell e com Mucell (9%, 10% e 11%)..... | 56 |
| Figura 48- Fotos relativas às superfícies dos provetes de PP Preto das diferentes variáveis em estudo Sem Mucell e com Mucell (7%, 9% e 10%)..... | 58 |
| Figura 49- Análise do Peso do peso Vs Contração do PBT Branco | 60 |
| Figura 50- Análise do Peso do peso Vs Contração do PBT Laranja | 61 |
| Figura 51- Análise do Peso do peso Vs Contração do PP Preto | 62 |

Índice de Tabelas

| | |
|--|----|
| Tabela 1-Comparação de algumas propriedades principais dos gases utilizados como espumas físicas [5]..... | 8 |
| Tabela 2-Efeito do processo MuCell® na redução do peso da peça [21] | 16 |
| Tabela 3-Parâmetros de injeção usados para processar o material PP | 29 |
| Tabela 4- Parâmetros de injeção usados para processar o material PBT | 30 |
| Tabela 5- Valores da % conseguida para o material PP na cor Preta..... | 31 |
| Tabela 6- Valores da % conseguida para o material PBT na cor Branca..... | 31 |
| Tabela 7- Valores da % conseguida para o material PBT na cor Laranja | 31 |
| Tabela 8-Valores de parâmetros do processo de injeção de peças em Polipropileno..... | 39 |
| Tabela 9- Tempo de ciclo detalhado do PP na peça em estudo..... | 40 |
| Tabela 10- Valores de parâmetros do processo de injeção de peças em PBT | 41 |
| Tabela 11- Tempo de ciclo detalhado do PBT na peça em estudo..... | 42 |
| Tabela 12- Medição de dois pontos, um no eixo do x e outro no eixo do y, para o material PBT Laranja. | 44 |
| Tabela 13- Medição de dois pontos, um no eixo do x e outro no eixo do y, para o material PBT Branco. | 45 |
| Tabela 14- Progressão da contração com o aumento da % de gás | 46 |
| Tabela 15- Medição de dois pontos, um no eixo do x e outro no eixo do y , para o material PP Preto.. | 47 |

CAPÍTULO 1 - Introdução

1.1. Empresa

A MICROplásticos é uma empresa familiar fundada em 1987 que possui três empresas, duas delas situadas na Figueira da Foz, mais precisamente na Cova da Serpe e Gala, e uma outra recente na Polónia. Dispõem de uma equipa de 415 trabalhadores que labora 24 hora/dia, 7 dias por semana e possui 76 máquinas de injeção. A MICROplásticos dedica-se à produção de componentes plásticos de alta precisão e elevado rigor dimensional, de acordo com as necessidades dos seus clientes e ainda projeta, desenvolve as suas peças.

O ramo automóvel, é, atualmente, o principal mercado da MICROplásticos, tendo tomado especial relevância no decurso dos últimos 12 anos. Possui ainda experiência no ramo elétrico, de mais 18 anos, onde a produção está vocacionada para equipamentos de segurança, como disjuntores, interruptores e peças de ligação. Construiu um *know-how* interno, no desenvolvimento e produção de componentes ligados à indústria de *consumer*. A MICROplásticos é fornecedora de 87 clientes que se encontram distribuídos mundialmente por 21 locais diferentes.



Figura 1- MICROplásticos

1.2. Enquadramento

Ao longo desta dissertação será comparado e analisado o processo de moldação por injeção com recurso à tecnologia *MuCell* VS moldação por injeção convencional. Para este estudo usou-se materiais poliméricos como o PBT e PP.

O PBT e o PP ao serem processados por moldação por injeção, com recurso à tecnologia *MuCell*, vão apresentar gás no seu interior (Dióxido de carbono ou Azoto), obtendo-se peças injetadas com menor densidade, mais finas e com o interior poroso, em comparação com as obtidas por injeção convencional, ou seja, sem injeção de gás. Ao longo do estudo analisar-se-á influência da incorporação das diferentes percentagens de gás injetado nos diferentes materiais poliméricos quer, em tempo de ciclo, resistência mecânica e resultado final da peça

bem como a análise da contração da peça em dois pontos, provocada pela percentagem de gás injetado. Por último e ainda com o recurso a uma ótica observou-se o comportamento das bolhas de gás no interior do material polimérico.

1.3. Objetivos

No presente trabalho pretende-se estudar e caraterizar os materiais poliméricos, como poli(tereftalato de butileno) e o polipropileno, processados por injeção com recurso à tecnologia MUCCELL, injetando-se Azoto gás adquirido pela empresa.

Os objetivos deste trabalho são os seguintes:

- Comparar o processo de injeção com recurso à tecnologia MUCCELL com a injeção convencional;
- Processar e otimizar os parâmetros de processamento por injeção com diferente percentagem de gás (Azoto) de uma peça para a área automóvel com diferentes materiais termoplásticos;
- Determinar as densidades relativas dos materiais poliméricos processados (PBT, PP com e sem gás);
- Obter provetes das peças injetadas, (PBT, PP com e sem gás) a processar, para realizar ensaios mecânicos, tais como ensaio de flexão em três pontos;
- Determinar as propriedades mecânicas dos materiais a processar (PBT, PP com e sem gás) em duas direções (perpendicular e paralela ao fluxo de injeção);
- Analisar a contração em dois pontos provocada pelas diferenças de percentagem de gás injetadas;
- Observar num ótico a dimensão e posição das bolhas de gás no interior da peça.

1.4. Estrutura da Dissertação

A presente dissertação encontra-se subdividida em 5 capítulos, sendo que o conteúdo de cada capítulo é descrito em seguida.

O primeiro capítulo é composto por uma breve descrição da empresa onde se realizou o projeto, por um enquadramento do projeto, bem como uma descrição dos objetivos do estudo efetuado.

O segundo capítulo refere-se aos conceitos teóricos, onde ocorre uma revisão teórica relevante para o desenvolvimento do estudo, nomeadamente (tudo o que vai estar no índice no capítulo 2).

O capítulo 3 descreve os procedimentos experimentais bem como, os equipamentos utilizados no processamento por injeção e caracterização mecânica dos materiais processados.

No capítulo 4 estão apresentados os resultados e a sua discussão.

Por fim, no capítulo 5, apresentam-se as conclusões retiradas ao longo do presente estudo.

2.1. Introdução

A competitividade do mercado automóvel exige uma maior atenção por parte das empresas em encontrar técnicas inovadoras, de modo a se diferenciarem com os seus produtos a nível estético e funcional. Os materiais termoplásticos começaram a ter um maior destaque na indústria automóvel, substituindo o alumínio e outros metais no desenvolvimento de novos componentes para os automóveis. A preferência por materiais poliméricos teve como base as boas propriedades mecânicas e a liberdade de design combinada com a excelente aparência estética. De momento, mais de metade dos componentes do interior dos automóveis são de origem polimérica, incluindo componentes de subsistemas de segurança, painel de instrumentos entre muitos outros. A utilização de polímeros nesta indústria deve-se ao facto de melhorarem a eficiência dos automóveis em termos energéticos, reduzindo o peso e consequentemente o consumo de combustível e em termos de durabilidade consegue-se uma melhor resistência à corrosão e à dureza.

A maioria das peças desenvolvidas para área automóvel são produzidas através do processo de moldação por injeção. Este processo diferencia-se pela capacidade de produzir peças complexas com dimensões rigorosas e permite-nos realizar grandes produções em massa a um preço bastante económico e competitivo.

Associada ao processo de injeção por moldação surgiu a tecnologia *MuCell*. Esta técnica baseia-se na fusão do material polimérico com um gás, agente expensor físico, dando origem a peças que podem apresentar inúmeras vantagens, tais como: diminuição do ciclo de moldação por injeção, liberdade de design obtendo-se peças plásticas com geometrias mais complexas, redução de empenos e redução significativa do peso final da peça o que implica uma menor quantidade de material gasto na produção da peça, ganhos a nível económicos conseguido pela redução do tempo de ciclo e da economia de material.

Nesta dissertação será estudada a técnica de *MuCell* recorrendo ao processamento dos materiais poliméricos PP e o PBT com a incorporação de gás (azoto). Esta técnica permite obter uma peça final com gás no seu interior obtendo-se uma peça com interior poroso

2.1. Ciclo de moldação por injeção

A Moldação por injeção, é um processo cíclico que é composto por um conjunto de operações necessário à produção de uma peça moldada, que se designa por ciclo de moldação. O processo é composto por diversas fases, sendo que a sua otimização é fundamental para assegurar a rentabilização económica dos equipamentos adquiridos.

O ciclo de moldação inicia-se com a passagem da matéria-prima por um sistema de secagem e desumidificação, de acordo com a temperatura e tempo estipulados na ficha técnica do material. Posta essa fase preliminar, o ciclo de injeção inicia-se com o fecho do molde, seguindo-se o aquecimento do material até adquirir uma viscosidade suficientemente baixa. Logo a seguir, ocorre a injeção do material para a moldação e posteriormente a compactação, onde o fuso pressuriza o fundido com uma determinada pressão. De seguida, dá-se início à fase de pressurização ou 2º pressão. Esta fase é imprescindível para que a peça não apresente defeitos, uma vez que, ao pressurizar novamente material para dentro da moldação, compensasse a contração do fundido e impede-se o refluxo do fluido. Por fim, dá-se a fase de arrefecimento. Assim que assim que a peça possa ser extraída sem distorção, o molde abre e a moldação é “desmoldada” por extratores. Com a ajuda de um robot as peças acabadas de injetar são transportadas para um tapete rolante. [1] Como demonstra a Figura 2 apresenta as diferentes etapas do ciclo de injeção.

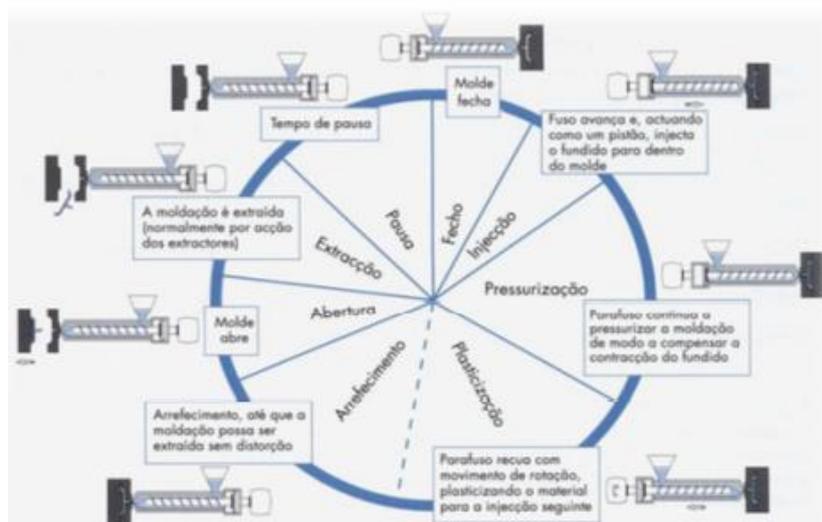


Figura 2- Ciclo de moldação [2]

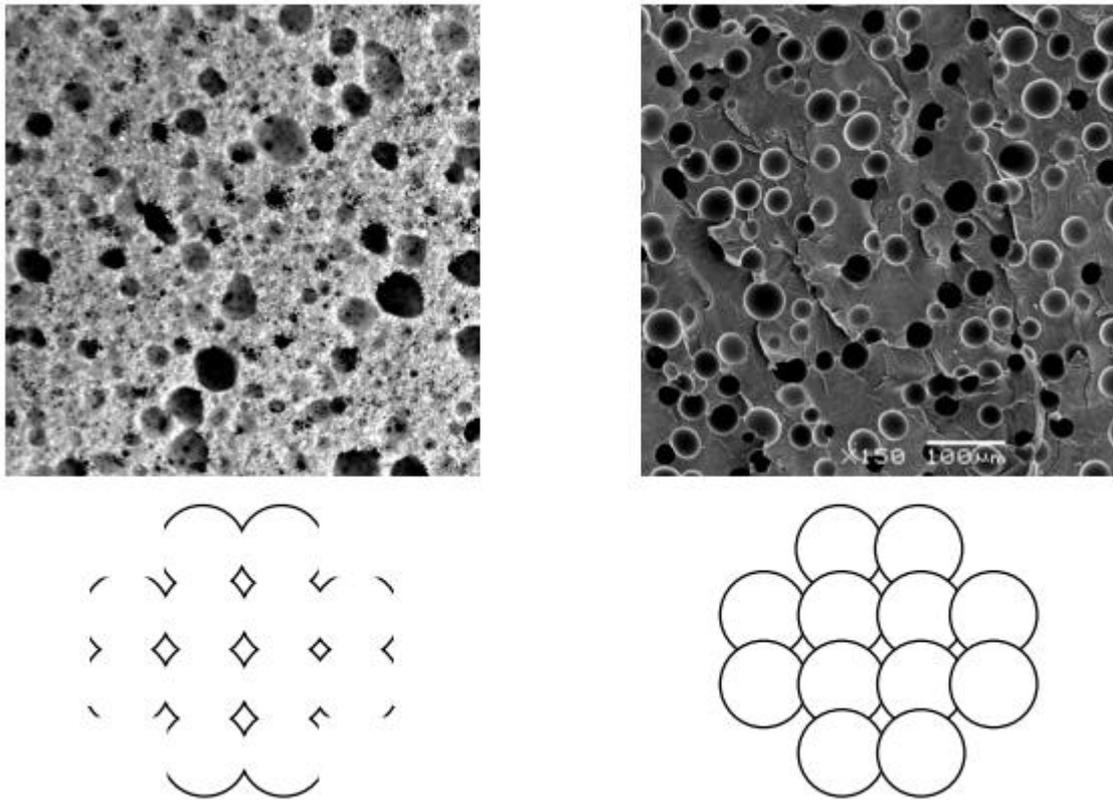
2.2. Espumas celulares

As espumas celulares são compostos por duas fases, a matriz polimérica que é a fase sólida e a fase gasosa formada por células derivadas do agente expensor [3]. Para atingir esta estrutura, um agente expensor físico ou químico é introduzido no polímero fundido e ocorre a dispersão deste agente em pequenas bolhas produzindo-se a estrutura celular. Estas células expandem o material conforme o diâmetro das mesmas aumenta, até que se estabilizem devido aos efeitos da viscosidade do polímero, do volume livre existente na cavidade e do arrefecimento do molde. [4], [5],[6].

São diversos os polímeros que podem ser utilizados para a combinação com os agentes expansores, tais como: poliuretano, polipropileno, polietileno, policloreto de vinil, poliestireno, polietileno-co-acetato de vinila, poliestireno-co-butadieno, poli(tereftalato de butileno)entre outros [7].

Os materiais poliméricos quando juntos com o agente expensor apresentam inúmeras vantagens em termos de processamento. Permitem reduzir a quantidade de material polimérico utilizado e aumentar as velocidades de produção, o que gera redução de custos. Porém, a seleção da matriz polimérica, bem como as adaptações das peças a serem injetadas com materiais celulares (modificações geométricas, espessuras, etc.) são de grande importância para podermos substituir um material sólido (material sem agente expensor), sem comprometer a funcionalidade da peça [4].

As propriedades desses materiais dependem, inicialmente, em grande parte do tipo de célula, da qual duas classes são identificadas: como apresentado na Figura 3 as células abertas, não possuem parede celular logo encontram-se interconectadas e, portanto, o gás circula livremente de uma célula para outra. Por sua vez, as que possuem células fechadas, têm gás dentro das suas paredes e essa morfologia pode ser interligada, uma vez que cada célula pode ser circundada por faces interconectadas. Embora neste modelo as faces das células possam ter uma espessura maior do que a da célula aberta, é possível que durante a sua formação se rompam e percam a forma.[8]



A) Célula aberta

b) Célula fechada

Figura 3- Esquema da estrutura: a) Espuma de célula aberta; e b) Espuma de célula fechada[9].

2.3. Agente expensor

Em geral, os agentes expansores são classificados de duas maneiras: agentes físicos (AEF) e agentes químicos (AEQ). Os agentes de expansão físicos fornecem o gás que se expandirá no polímero por meio da mudança do estado físico. Isso envolve, a volatilização de um líquido ou a libertação de um gás comprimido à pressão atmosférica após ser incorporado ao polímero, geralmente em temperaturas e / ou pressões elevadas [9].

Como agentes de expansão físicos mais comuns, temos o azoto (N_2) e o dióxido de carbono (CO_2). Estes agentes de expansão são usados para a produção de espumas termoplásticas com uma ampla gama de densidades, pelo facto de apresentarem vantagens tais como: ser atóxico, por se dissolver rapidamente, pelas suas propriedades de não inflamabilidade e pelas suas temperaturas e pressões críticas relativamente baixas [10],[9].

O CO₂ é barato e por sua vez abundante, pode ser processado em condições moderadas e usado em diferentes estados e tem excelente solubilidade na maioria dos polímeros.

O N₂ tem menor solubilidade em polímeros comuns e, como consequência, são necessárias maiores pressões de processo. No geral, o N₂ é usado para formar espumas de polímeros com alta viscosidade ou para injetar peças de difícil enchimento. Utilizando este gás são produzidas espumas com maior densidade celular e maior taxa de expansão por unidade de volume [9].

No que diz respeito aos AEQs, são substâncias orgânicas ou inorgânicas reativas no estado sólido. Eles são adicionados ao polímero na fase inicial do processo e decompõem-se numa reação exotérmica ou endotérmica, libertando gases que darão origem à estrutura celular, geralmente N₂ e CO₂.

Para a seleção do agente de expansão, alguns cuidados devem ser tomados, principalmente devido às considerações ambientais, entre os quais se destacam: o efeito que tem sobre a camada de ozono, o efeito estufa, a sua toxicidade no contato humano durante o processo. Por esta razão, procura-se usar gases inertes como agentes de expansão, daí surgem o CO₂, N₂, O₂ [11],[9].

Quanto à eficácia do agente, um dos pontos mais importantes é a sua solubilidade no polímero base. Uma boa solubilidade, permite uma redução na pressão mínima de fusão para manter o agente em solução. Também permite a redução da temperatura do processo, facilitando o arrefecimento e assim obtém-se otimização do ciclo. Pelo contrário, para um agente com menor solubilidade no polímero, serão necessárias temperaturas e pressões mais altas, o que pode causar degradação do polímero.[5, 6]

2.4. Conceitos básicos sobre a formação de uma espuma.

Inicialmente, na unidade de fornecimento de fluido supercrítico, o gás é pressurizado até atingir o ponto SCF. Em função do gás utilizado, quando se atinge uma determinada pressão crítica (PC) e uma temperatura crítica (TC), atinge-se o chamado ponto crítico, que é quando o gás atinge o estado SCF, como é possível visualizar na Figura 4. Neste estado SCF o gás possui as propriedades de um líquido, mas mantém-se no seu estado gasoso, ou seja, o fluido tem as propriedades de dissolução de um líquido, mas as propriedades de difusão de um gás. Isso significa que ele pode dissolver substâncias como um líquido, enquanto se expande para encher uma cavidade como um gás no qual não existe mais distinção entre as fases líquida e gasosa [12][13].

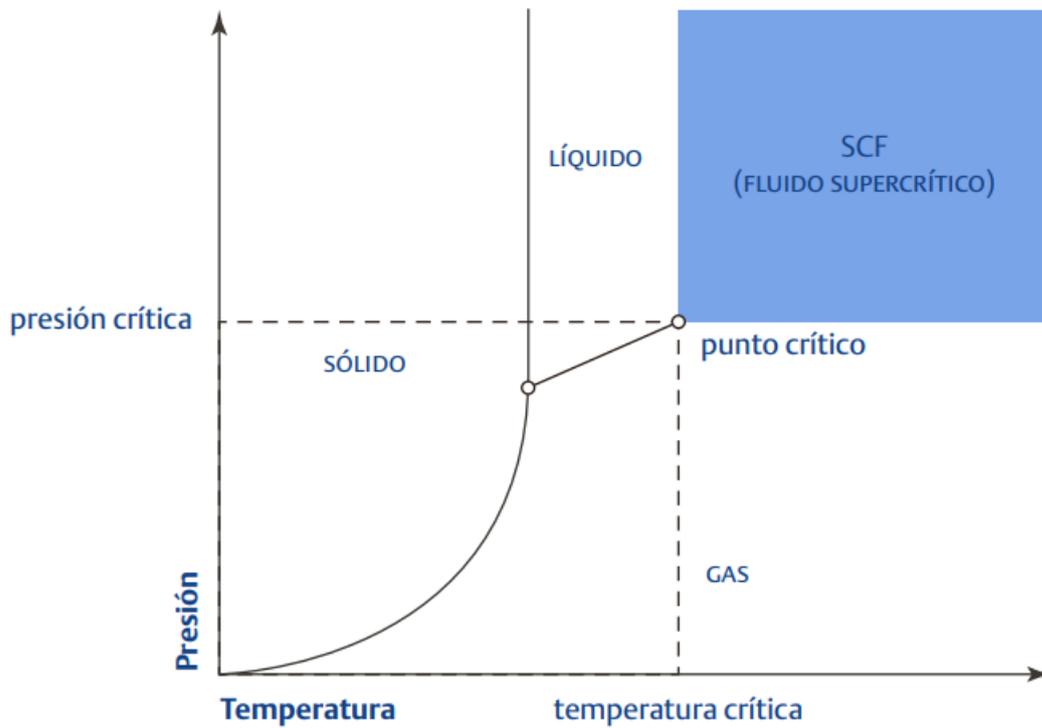


Figura 4- Diagrama de fases do fluido no estado crítico[14]

A Tabela 1, mostra a comparação de algumas das propriedades dos gases usados como agentes de expansão físicos.

Tabela 1-Comparação de algumas propriedades principais dos gases utilizados como espumas físicas [5].

| | CO ₂ | N ₂ | O ₂ |
|-------------------------|-----------------|----------------|----------------|
| Peso molecular(g/mol) | 44 | 28 | 32 |
| Ponto de ebulição(°C) | -78.3 | -195.8 | -183 |
| Temperatura crítica(°C) | 31 | -147 | -118.3 |
| Pressão crítica (MPa) | 7.1 | 3.4 | 5 |

Quando o gás atinge o estado SCF, é injetado no início do sistema de homogeneização do parafuso como observável na Figura 5 (5a), onde o polímero fundido e o SCF são misturados formando, uma única fase, ou seja, o gás difunde-se e distribui-se por todo o material na forma de gotas. Estas gotas são alongadas ao longo do cilindro de plasticização, que resulta do cisalhamento derivado da rotação do parafuso (5b). O grau de cisalhamento varia ao longo do canal do parafuso, fazendo com que os tamanhos das células sejam diferentes e assim vão se dividir numa infinidade de gotículas de gás menores ao longo do parafuso. Estando as gotículas de gás uniformemente distribuídas na matriz do polímero fundido, teremos uma solução singular pronta para nuclear.[15][13]

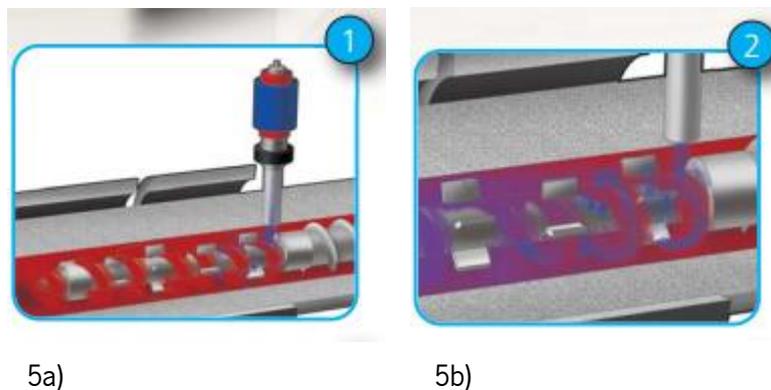


Figura 5- Etapas iniciais da formação de espumas antes de o material entra no molde[15].

Nucleação

O início desta etapa é marcado pela indução de uma rápida instabilidade termodinâmica, ou seja, uma rápida queda de pressão ou variação de temperatura que neste caso aplica-se na entrada do molde (ou na saída do bico) onde ocorre uma supersaturação do gás na matriz polimérica. Como consequência disso, ocorre a formação de uma segunda fase no polímero fundido, onde são geradas as células iniciais, que atraem as moléculas de gás que estão na sua vizinhança. Quanto maior for a queda de pressão, maior será o número de células geradas inicialmente[13],[9].

Expansão/Crescimento celular

As moléculas de gás atraídas pelas células ligam-se a elas, uma vez que a pressão da solução polímero / gás é maior do que a pressão dentro das células. Quando atingem um raio crítico, as células estabilizam e começam a expandir[13].

Solidificação

Durante o processo o molde vai sendo arrefecido continuamente e no interior do material é criado uma estrutura celular interna que se vai estabilizando. O resultado é um material espumado com tamanho celular cerca de 5 a 100 microns dependendo das condições de processamento.[13]

2.5. Técnica de *Mucell*

2.5.1. Unidade de injeção

O processo *MuCell*, foi desenvolvido e é comercializado pela empresa *Trexel*. Este é um processo de moldação por injeção microcelular que tem sido aplicado na indústria automóvel e doméstica. Processo este que tem a capacidade rápida de desenvolvimento de produtos, liberdade de design, redução de empenos nas peças, máquina de injeção mais pequena (menos força de fecho), produtos com novas geometrias e mais finos o que leva a uma redução do peso da peça, tempos de ciclos mais curtos e economia de custos operacionais e de capital. As peças processadas apresentam uma menor qualidade superficial, quando comparadas com as obtidas por injeção convencional, consequência do processo de injeção que leva uma mistura de um polímero com gás (CO₂ ou N₂) [16], [17]-

Os equipamentos para injeção de peças com tecnologia *MuCell*, apresentam algumas diferenças quando comparados com os equipamentos convencionais de injeção. Começando pela primeira diferença notável e fundamentável é o controlador do fluxo SCF (sistema de distribuição SCF), como demonstra a Figura 6. Esta unidade possui ainda um sistema de compressão e regulação para manter o fluido num estado supercrítico antes de ser injetado no polímero fundido que se encontra dentro do cilindro do injetor e possui ainda um fuso de injeção próprio para o sistema *MuCell* como apresenta na Figura 7.



Figura 6- Controlador do fluxo SCF



Figura 7- Módulo de injeção próprio do MuCell [17].

Na máquina de injeção é ainda adaptado um ADPC (*Automatic Delivery Pressure Controller*) Figura 8, um regulador automático de pressão operacional, que está ligado ao controlador de fluxo SCF [11],[18].



Figura 8- regulador automático de pressão operacional[17].

É ainda adicionado o injetor do fluxo SCF Figura 9, que recebe o gás no seu estado SCF, proveniente do controlador do fluxo e injeta-o na unidade de plasticização(fuso).



Figura 9- Injetor do fluxo SCF[17].

Por sua vez, o fuso (sistema de plasticização) é constituído por uma válvula anti-retorno do SCF e uma zona de mistura, onde o gás é misturado com o fundido e se forma a solução chamada de fase singular [11]. Quanto à sua geometria, deve garantir uma relação de comprimento/diâmetro (L/D) de 24/1, a título de curiosidade é um pouco maior que em um fuso de uma injetora convencional de modo a melhorar a mistura entre polímero e gás. Na Figura 10 estão descritas as diversas fases ocorridas no fuso desde a entrada do material polimérico e do SCF até se formar a fase singular.

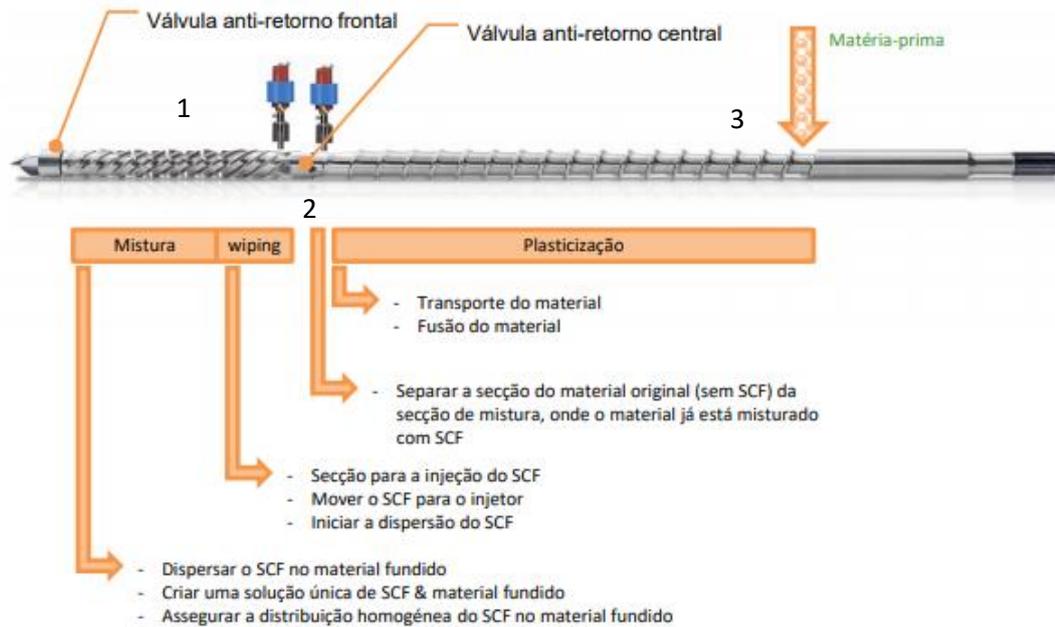


Figura 10- Diferentes fases ocorridas no fuso[19].

2.5.2. Fases de injeção

O processo *MuCell* permite a redução do tempo de ciclo devido, ao efeito da expansão celular no interior da cavidade, reduzindo significativamente o tempo de injeção e arrefecimento.

No fabrico de uma peça por injeção, recorrendo ao auxílio da tecnologia *MuCell*, estão presentes seis etapas fundamentais que correlacionam a mistura do gás com o polímero, que serão descritas abaixo:

Da fase 1 a 3 ocorre o estado de plasticização e da 4 a 6 o estado injeção[18],[20],[13],:

1. O gás é comprimido até atingir o ponto SCF quando atinge uma determinada temperatura e pressão crítica, o gás passa a SCF adquirindo propriedades de um líquido, mas estando no seu estado gasoso;

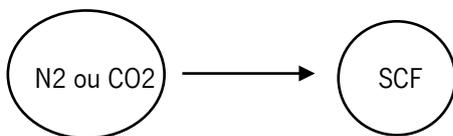
2. Realização de operações de controlo e de dosagem do fluxo;

3. Injeção do fluxo gasoso no estado SCF, no polímero a injetar; formação de uma solução de fase singular;

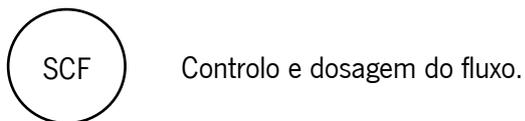
4. A solução é injetada para o interior do molde;

5. Ocorre o crescimento celular, ou seja, expansão do gás no interior do molde criando pequenas bolhas provocadas pela queda de pressão e da temperatura atingida;

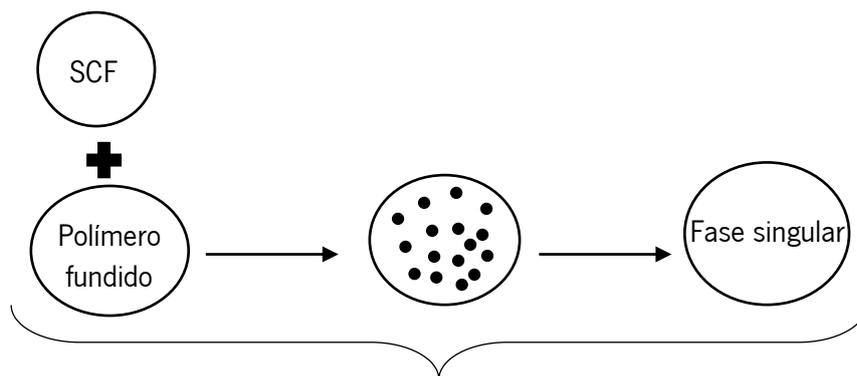
6. Por fim obtemos a peça com a geometria desejada de acordo com a zona moldante do molde.



Fase 1

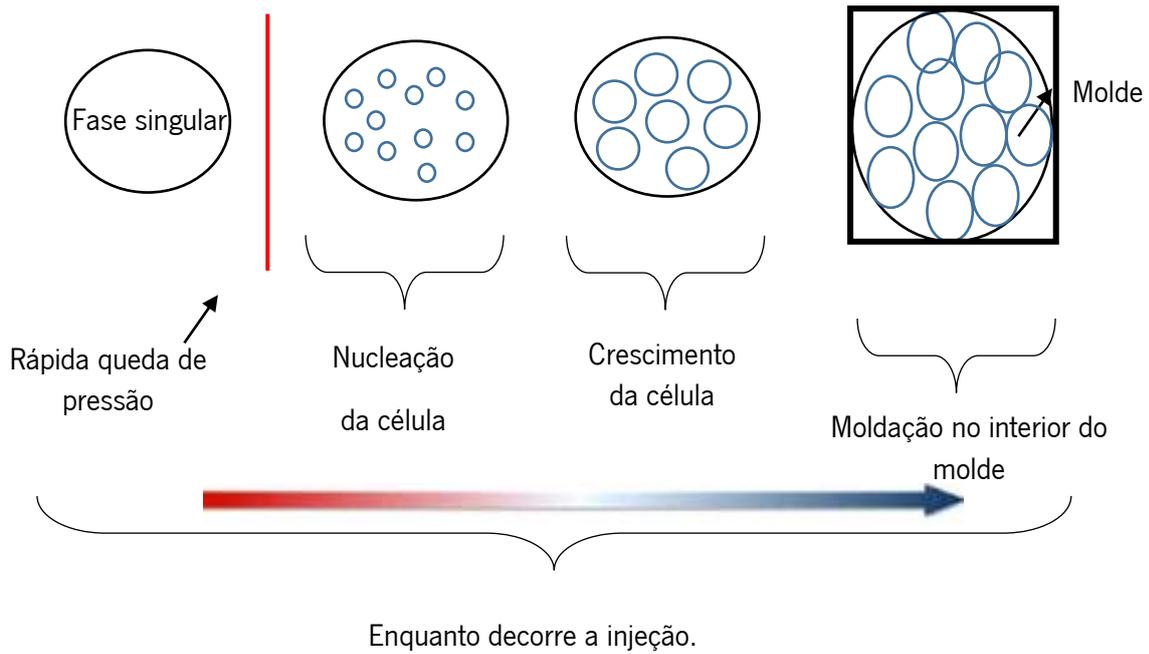


Fase 2



Mistura e dissolução do SCF no polímero fundido.

Fase 3



Fase 4/5/6

Abaixo na Figura 11 temos a representação da unidade de injeção de *Mucell [Trexel]*

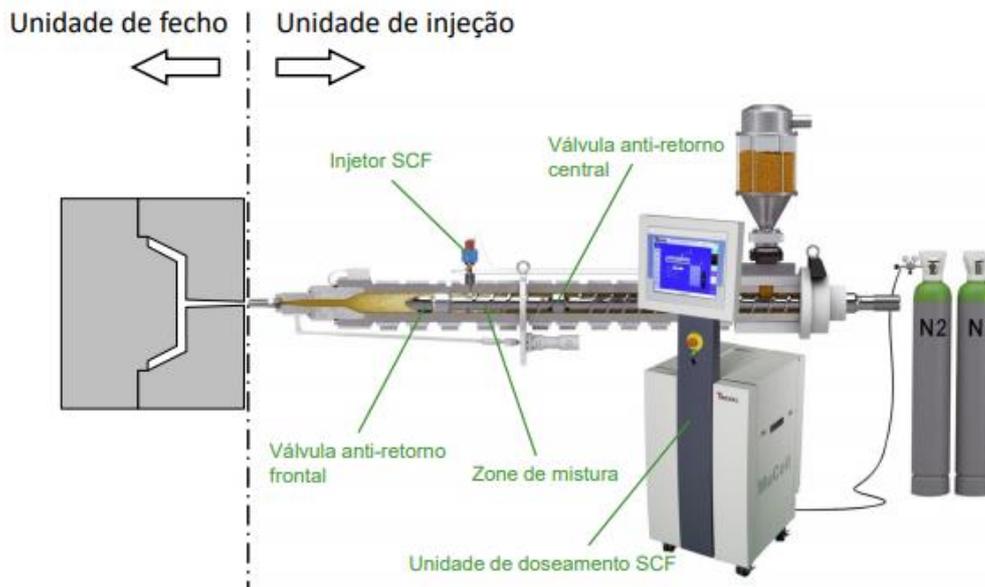


Figura 11-Unidade de injeção de Mucell®[19]

2.6. Características do processo de moldação por injeção de espuma microcelular- Processo *Mucell*

Devido ao SCF injetado no polímero no fundido é notório o efeito da viscosidade no ciclo do processo de moldação por injeção, no peso das peças, nas propriedades mecânicas e na qualidade superficial, entre outros.

2.6.1. Viscosidade do fundido

De acordo com os trabalhos de investigação na área, quando o SCF é dissolvido no polímero fundido, a temperatura de transição vítrea desse polímero torna-se mais baixa. Desta forma a viscosidade do polímero diminui, a pressão da injeção necessária é menor do que a injeção tradicional e o requisito das propriedades da máquina de injeção também são menores. A Figura 12 mostra o efeito do fluido supercrítico na viscosidade do fundido e conclui-se que a viscosidade diminui após a adição do SCF, quer seja de nitrogénio ou dióxido de carbono [16].

Deve-se ressaltar que o efeito do fluido supercrítico na viscosidade é determinado pelo tipo de polímero e carga.

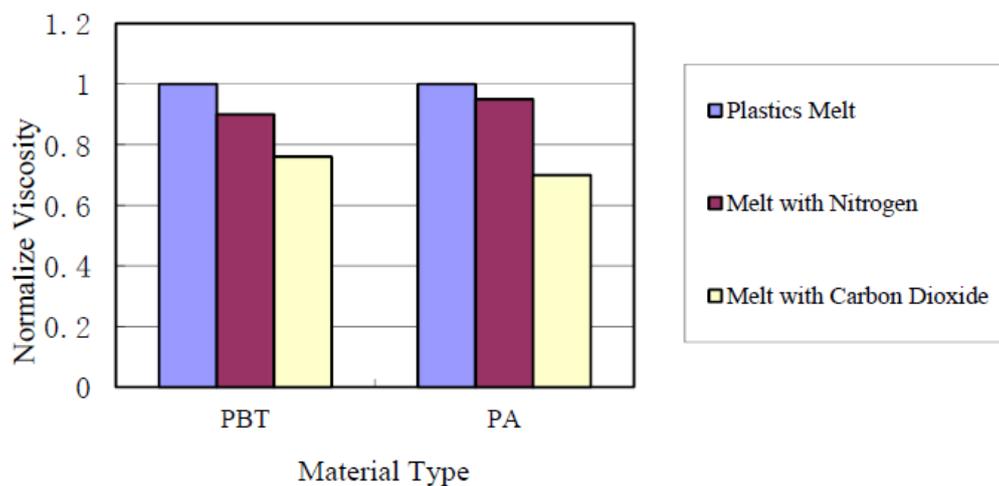


Figura 12- Efeito do SCF na viscosidade do fundido[16].

2.6.2. Tempo de ciclo de injeção

A tecnologia *MuCell* contribui para a redução do Tempo de ciclo e as razões principais dessa redução são[16]:

1. Como as bolhas do gás exercem compactação, a fase de compactação pode ser praticamente eliminada;
2. Quando milhares de bolhas crescem (no interior da peça) são todas reações endotérmicas, assim o tempo de arrefecimento é economizado;
3. Devido às bolhas presentes na peça, o peso da peça é reduzido;
4. Menor viscosidade significa maior velocidade de enchimento. Deste modo o tempo de enchimento torna-se mais curto. Geralmente 20% a 50% do tempo o ciclo pode ser economizado.

2.6.3. Peso da peça

A presença de bolhas no interior da peça leva à economia de material. Observando a Tabela 2 abaixo verifica-se, para diferentes materiais poliméricos e espessura das peças, a redução do peso que podemos vir a conseguir economizar.

Tabela 2-Efeito do processo *MuCell*® na redução do peso da peça [21]

| Polymer | Part thickness(mm) | Weight reduction (%) |
|-------------------|--------------------|----------------------|
| Polyphenylsulfone | 5 | 50 |
| PS | 1.5 | 30 |
| Acetal | 1.5 | 15 |
| PET | 5 | 30 |
| TPE | 1.5 | 20 |
| PP (30%Talc) | 2.1 | 25 |
| HDPE | 5 | 60 |
| PC/ABS | 2.1 | 23 |
| PA | 1.2 | 9 |
| PA(40% Filler) | 2 | 15 |
| PC | 7.2 | 45 |

2.6.4. Propriedade mecânicas da peça

As propriedades mecânicas das peças são alteradas devido à presença das bolhas de gás. As primeiras pesquisas indicam que a resistência à flexão da peça processada com *MuCell* é quase igual à

do polímero sólido (processada com a técnica convencional). Quando analisados os valores, verifica-se que a resistência á tração diminui proporcionalmente com a densidade da espuma, isto significa que uma espuma de densidade relativa de 50% tenha 50% da resistência do polímero sólido. Quando a peça é sujeita a uma resistência de impacto, esta torna-se mais sensível e diminui linearmente com a densidade da espuma[16].

A Figura 13 mostra a resistência á flexão, tração e impacto do material PBT (30% GF) a diferentes taxas de redução de peso do material em estudo.

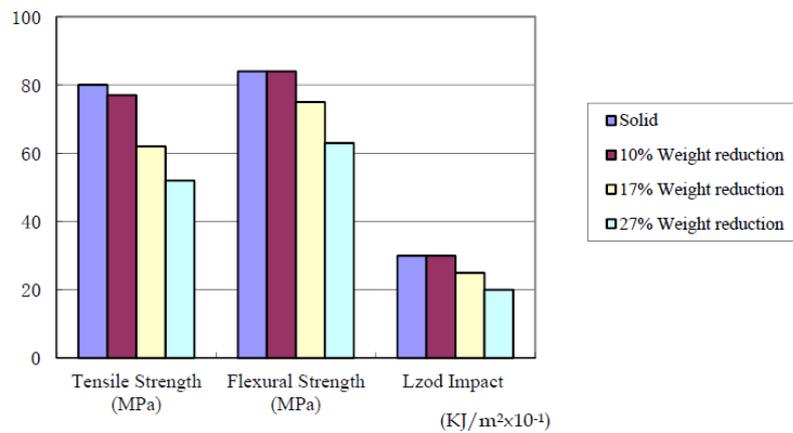


Figura 13-Ensaio mecânico (resistência á flexão, tração e impacto do material PBT(30% GF))[16].

2.6.5. Qualidade superficial

A presença do SCF é visível na superfície do produto acabado, portanto a qualidade superficial da peça é pior do que as peças processadas pelo processo tradicional. Os defeitos típicos que surgem na superfície da peça são: marcas de remoinhos, riscos prateados e bolhas na superfície. Os riscos prateados são notórios em peças pretas como é possível visualizar nas peças injetadas, Figura 14 b) e b1). A presença de bolhas na superfície da peça é possível verificar nas primeiras peças que se começaram a injetar, devido a elevada quantidade de gás, tal como podemos visualizar na Figura 14 c) e c1).

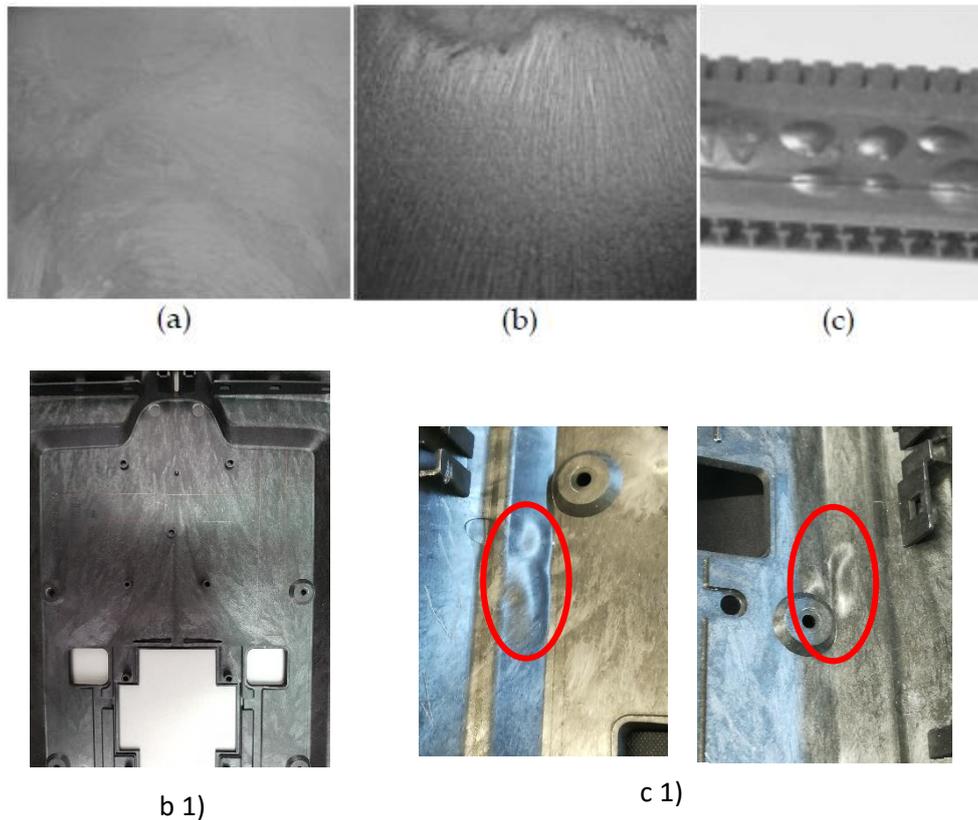


Figura 14-Defeitos superficiais de peças resultante do processo MuCell, (a)marcas de remoinhos; (b) e (b1) riscos prateados; (c) e (c1) bolhas[16].

2.7. O efeito do *design* do molde na morfologia porosa dos polímeros produzidos com a tecnologia *MuCell*.

Foi apresentado no artigo [16] um artigo, sobre um estudo da produção de implantes regenerativos. Neste estudo dois moldes foram projetados com geometrias diferentes para os mesmos parâmetros de processo, com recurso á tecnologia *MuCell* e assim gerarem implantes com estrutura porosa para uso médico. Obtiveram-se dois produtos finais diferentes e essas diferenças foram estudadas. Como matéria-prima escolhida para a produção dos implantes foi usado o TPU e como agente expensor o CO₂.

Para produzir o implante foram projetados dois moldes. Para o molde A foram processados seis anéis e para molde B foram processados seis discos sólidos, como podem ser visualizados na Figura 15.

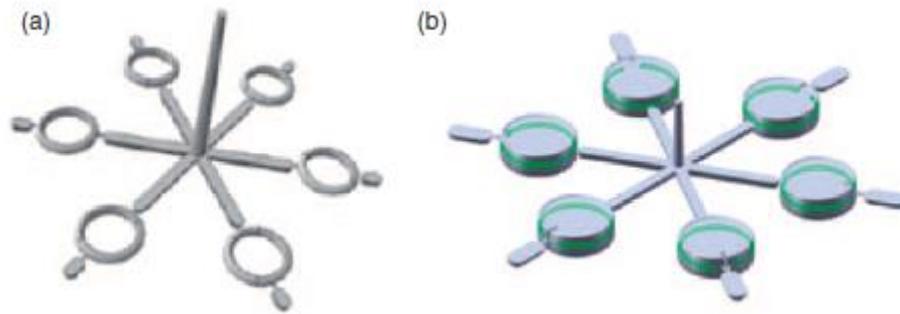


Figura 15- Desenhos técnicos dos implantes[16].

Os dois moldes têm ataques e canais de alimentação, contudo o molde B possui um canal de alimentação mais curto e espesso, o que leva a uma melhor nucleação e a um melhor crescimento nuclear. Obtendo-se uma melhor morfologia dos poros, com um tamanho maior dos poros tornando assim os implantes mais leves.

Recorrendo a um microscópio, obteve-se, que mostra as estruturas dos poros dos implantes resultantes dos dois moldes que foram injetados a uma velocidade de injeção de 30 mm/s mantendo inalterável os restantes parâmetros do processo. Verificou-se que a imagem B, que veio do molde B, possui um aumento dos tamanhos dos poros, quando comparados com o da imagem A. Consequentemente, quanto menor for a relação L/D (comprimento/espessura) do canal de alimentação, maior porosidade será obtida na peça a processar. [16]

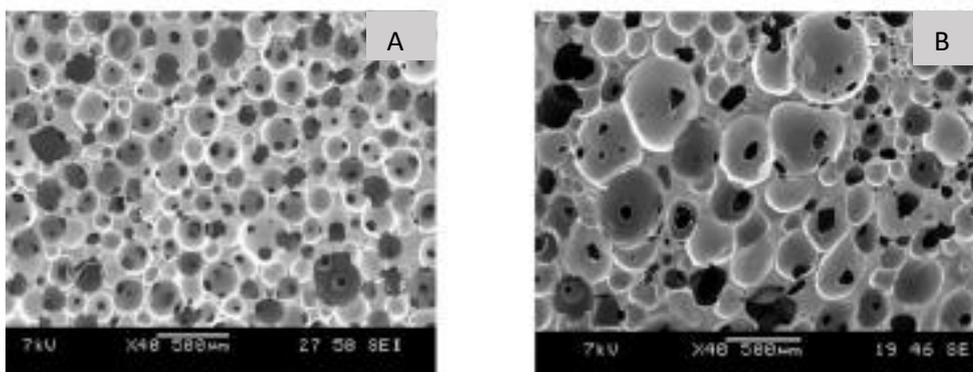


Figura 16- Diferença da estrutura porosa do molde B e do molde A, a uma velocidade de injeção de 300(mm/s)[16].

Verifica-se, na Figura 17, que para diferentes velocidades de injeção os implantes do molde B apresentam uma porosidade maior do que os dos implantes do molde A, sendo que o intervalo de porosidade no caso do molde B manteve-se entre os 73% e os 79%, enquanto no molde A, a variação de porosidade é entre os 60% e 67%.

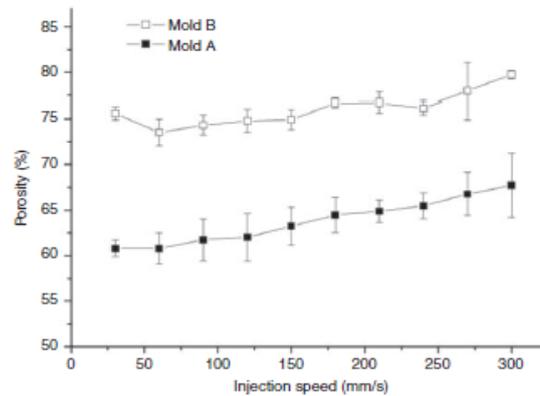


Figura 17- Diâmetro dos poros versus velocidade de injeção[16].

Na Figura 18 observa-se o tamanho médio dos poros dos dois moldes, para diferentes velocidades de injeção. Visualiza-se que o tamanho dos poros diminui com o aumento da velocidade de injeção, para ambos os moldes. O diâmetro dos poros do molde B diminui de 340 para 246 μm , com o aumento da velocidade de injeção, e o molde A apresenta o diâmetro dos poros de 234 a 152 μm para a mesma variação da velocidade de injeção. O tamanho médio dos poros do molde B em todas as velocidades foi maior em comparação com o molde A.

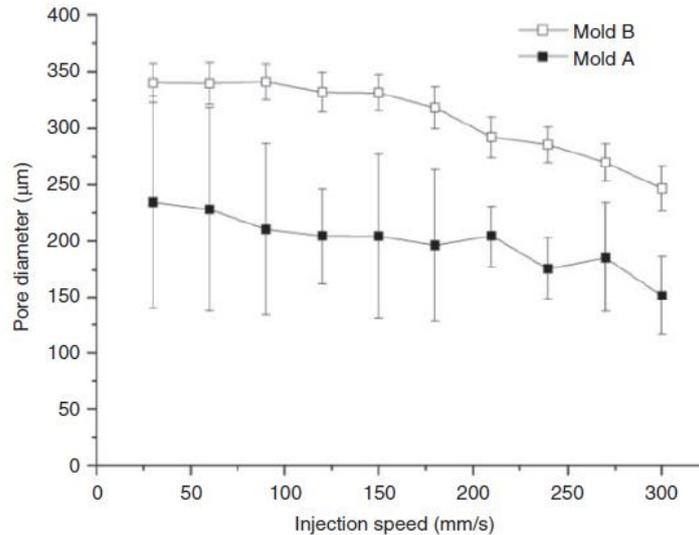


Figura 18- Diferença do tamanho dos poros versus velocidade de injeção[16].

Para terminar foram analisados vários parâmetros como, a redução de peso, percentagem de gás, temperatura do molde, temperatura de plasticização e velocidade de injeção. Observando a Figura 19 e Figura 20 é possível concluir, que na percentagem de porosidade máxima no tamanho dos poros, as peças processadas no molde B, apresentam valores superiores ao molde A, para todos os parâmetros de processo.

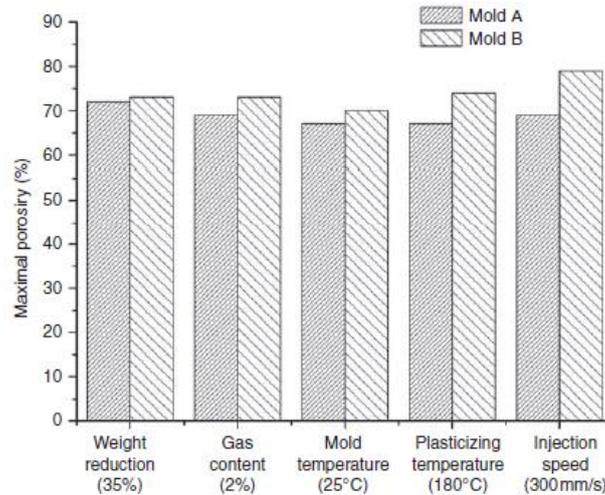


Figura 19- Diferença entre porosidade versus diferentes parâmetros[16].

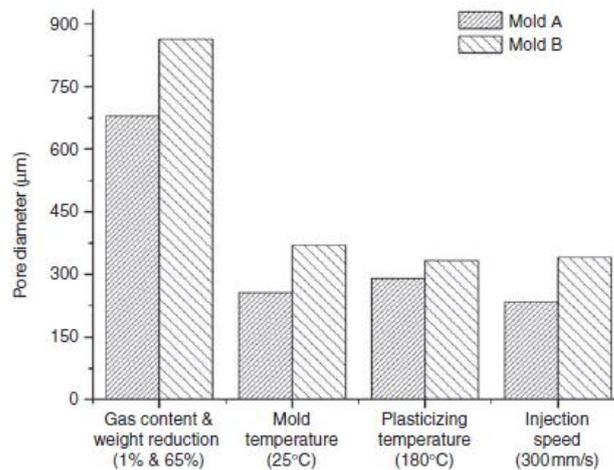


Figura 20- Diferença do tamanho dos poros versus diferentes parâmetros do processo[16].

Concluiu-se que a velocidade de injeção e a geometria do canal são os dois parâmetros com maior influência no processamento por injeção com *MuCell*. Estes parâmetros, quando devidamente controlados, permitem ter um melhor domínio da porosidade da peça final.

2.8. Vantagens VS Desvantagens do processo *MuCell*

2.8.1. Vantagens

A moldação por injeção usando *MuCell*, para materiais termoplásticos, oferece flexibilidade de design exclusiva e oportunidade de economia de custos não encontradas na moldação por injeção convencional.

A redução da viscosidade pode chegar aos 30% (no caso de materiais com fibras de vidro pode variar entre os 10- 15%), melhorando o índice de fluxo de fusão (MFI) do material, que flui mais rápido reduzindo assim o tempo de injeção. Uma vez que o molde poder ser mantido a uma temperatura mais baixa e a fase de compactação praticamente ser eliminada, contribui para a redução do tempo de ciclo até 50%. Além disso, a redução da viscosidade ajuda a operar com uma pressão mais baixa, e, portanto, com uma força de fecho significativamente mais baixa. Por esse motivo teremos máquinas menores, que são mais acessíveis, ocupam menos espaço e consomem menos energia.[22, 23]

As exigências dos clientes são definidas por mais funcionalidade com peso reduzido e controle de custos. A única maneira de interpretar corretamente essas exigências de mercado, e oferecer soluções que sejam económicas no longo prazo, é abraçar novas tecnologias de forma responsável e eficiente.

A moldação por injeção micro celular, conhecida comercialmente como processo *MuCell* é, capaz de uma produção em grande escala de peças com geometria complexas e de excelente estabilidade dimensional. Neste processo o fluido supercrítico, geralmente conhecido como nitrogênio ou dióxido de carbono, é misturado no polímero fundido para criar uma solução monofásica uniforme, sendo depois injetado na cavidade do molde. A tecnologia *MuCell* é um processo que consiste na injeção de um gás no polímero fundido que por sua vez se expande proporcionando as seguintes vantagens [18],[20]:

- Economia de peso;
- Redução da pressão da cavidade interna;
- Redução da força de fecha da máquina;
- Redução da viscosidade do material;
- Redução/eliminação do tempo de compactação;
- Redução significativa da temperatura do processo;
- Redução geral do tempo de ciclo;
- Elimina chupados no produto final;
- Melhora o empenamento;
- Estabilidade dimensional e redução de empenos assegurada pelo o gás injetado que garante uma boa distriuição do material plástico;
- A maioria dos polímeros de engenharia são capaz de ser processados sem comprometer significativamente o desempenho e a durabilidade.

As inúmeras vantagens de custo e processamento levaram à rápida implementação global do processo *MuCell* principalmente em aplicações automóveis, eletrónicas de consumo, dispositivos

médicos e embalagens. Tudo isto referido anteriormente é obtido sem necessidade de materiais plásticos personalizados, caros ou aditivados e sem causar defeitos internos.[22–24]

2.8.2. Desvantagens

Apesar dos benefícios retratados anteriormente, a aplicação generalizada de *MuCell* é dificultada pelo controlo sobre o processo de formação da espuma microcelular. A presença do gás no polímero leva á presença de esbranquiçados no acabamento superficial da peça. Estas imperfeições superficiais podem ser corrigidas usando co-injeção ou tecnologia de decoração no molde, mas isto leva a um custo adicional e alto. [22–24]

Os principais desafios industriais são:

- Conseguir um bom acabamento superficial resultante da combinação de polímero e SCF;
- Controlo das variações das condições do processo como temperatura e a pressão;

Tendo em conta os trabalhos de invstigação ja existens na área, podemos ver na Figura 21, algumas das vantagens descritas anteriormente postas em prática [19].

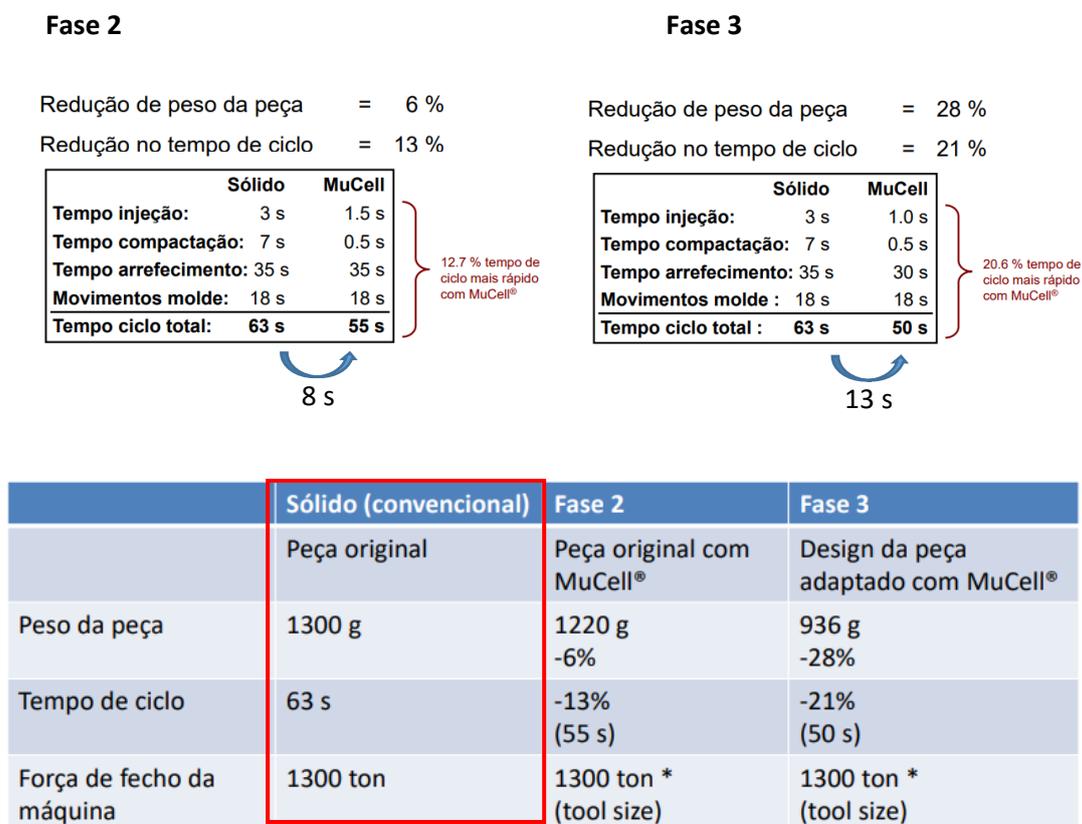


Figura 21- Redução nas Diferentes etapas do processo[19].

Para o mesmo polímero injetado, pode-se verificar que na fase 2, existe um decréscimo de 8s, passando o tempo de ciclo para os 55s, cerca 13% de redução do tempo de ciclo. Por sua vez, na fase 3 temos uma redução de 13s, ou seja, uma redução de 21% no tempo de ciclo. Esta redução é significativa no tempo de injeção (existe uma menor quantidade de material a injetar) e no tempo de compactação (pressurização e plasticização), este processo não necessita de 2º pressão (esta fase é substituída pelo gás).

Contudo para este processo é necessário um custo de investimento inicial um pouco elevado e exige um elevado controlo do gás e necessidades de formação. Apresenta peças com menor resistência ao impacto (vantagem para certas aplicações) e as peças exteriormente não apresentam boa qualidade visual (fica esbranquiçada e com um toque diferente) provocado pela incorporação do gás, por fim, a literatura que se encontra ainda é pouca e quase toda ela é apresentada pela *Trexel* (empresa detentora da *MuCell®*)[19].

2.9. Aplicações industriais

Segue-se uma apresentação de alguns casos práticos de aplicações de peças processadas com a tecnologia *MuCell®*, que fornece peças plásticas mais leves e precisas a custos de produção mais baixos

Painel de Controle climático/ Indústria automóvel



- Força de fecho da máquina reduzida de 250 toneladas para 75 toneladas, o que equivale a menos 70% de exigência da máquina de injeção;
- Redução de tempo de ciclo em cerca de 23%;
- Redução de peso da peça, em cerca 10%.

Ford Escape/Painel de Instrumentos/ Indústria automóvel



- Melhores propriedades mecânicas;
- Redução aproximada de 0.5 Kg em cada peça;

Embalagem de armazenamento / Indústria alimentar



- Redução do peso em cerca de 6%;
- Pressão de injeção reduzia em cerca de 15%;
- Maior liberdade de design, e a local de vedação do produto mais grosso no final do enchimento;
- Força de fecho da máquina reduzida em 50%.

Indústria médica



Devido aos acordos de confidencialidade não podem ser divulgadas informações, a não ser alguns dos equipamentos:

- Equipamentos de análise de sangue;
- Eletrocardiograma e Oxigénio *Sensing*;
- Endoscópios;
- Monitores cardíacos.

Paletes de plástico / Armazéns



- 10% de peso/material reduzido ;
- Força de fecho da máquina reduzida em 50 – 70%

3.1. Materiais em estudo

3.1.1. PBT

O poli (tereftalato de butileno) é um termoplástico semi-cristalino que pertence á da família das resinas de poliéster. Os poliésteres combinam excelentes propriedades mecânicas elétricas e térmicas, boa estabilidade dimensional, boa resistência química e às intemperes. A sua alta rigidez combinada com o bom desempenho de envelhecimento térmico e a resistência química permite que ele substitua algumas peças metálicas em aplicações automotivas.

O PBT está disponível com diferentes viscosidades adequadas à moldação por injeção e extrusão. Alguns *graus* de poli (tereftalato de butileno) (PBT) apresentam rápida cristalização, permitindo rápidos tempos de ciclo. O PBT é especialmente adequado para aplicações de engenharia que requerem elevada estabilidade dimensional e possui baixo coeficiente de expansão térmica e baixa absorção de água.[25][26]

Propriedades chave do poli (tereftalato de butileno) (PBT):

- Elevada resistência;
- Elevada temperatura de serviço em contínuo (até 150 °C);
- Muito boa resistência à fluência inclusive a temperaturas elevadas;
- Elevada rigidez e dureza;
- Boa resistência ao atrito e abrasão;
- Elevada estabilidade dimensional;
- Boa resistência às intempéries.

3.1.2. PP

O polipropileno é um membro da família das poliolefinas que também inclui o polietileno e é um dos materiais termoplásticos mais usados no mundo atualmente. Tanto o polipropileno homopolímero quanto o copolímero oferecem excelentes resultados á humidade e boa resistência química a solventes químicos , bases e ácidos[27].

O polipropileno pode ser dividido em 3 grupos principais[27]:

- Os graus de Polipropileno Homopolímero que exibem elevada rigidez;
- Os graus de Polipropileno Copolímero que proporcionam desempenho superior aos impactos até a temperaturas baixas;
- Os graus de Polipropileno copolímero *random* ou copolímeros estatísticos são transparentes.

O Polipropileno admite uma temperatura de injeção entre 215°C a 245°C e uma temperatura de molde entre 20°C a 60°C. A contração varia aproximadamente de 1 a 2,5%. Para além destas características o polipropileno apresenta inúmeras vantagens tais como[28]:

- A densidade do polipropileno é uma das mais baixas de entre todos os polímeros, na ordem dos 0,905 g/cm³, permitindo-lhe assim obter peças com baixo peso;
- Baixo custo;
- Maior sensibilidade a luz UV e a agentes de oxidação, degradando-se com maior facilidade;
- Apresenta elevada rigidez, superior à da maioria dos plásticos comerciais;
- Boa resistência ao impacto a temperatura ambiente;
- Elevada resistência química e a solventes;
- Elevada resistência a fratura por fadiga ou flexão, sendo por isso muito aplicado em dobradiças;
- Baixa absorção de água;
- Baixa condutividade elétrica.

3.2. Processamento de peças por injeção com recurso à tecnologia *Mucell Vs Sem Mucell*

Este estudo consiste em injetar uma peça do ramo automóvel com e sem a tecnologia *Mucell* e posteriormente comparar a nível de tempos de ciclo, de contração, módulo de elasticidade e ainda observar as bolhas no núcleo da peça.

Para o processo foi usada uma máquina *Engel duo 600* visível na Figura 22, (que está regida pela norma ISO Relativa no seu software de injeção e que por sua vez esta norma é mais intuitiva e ajuda no processo com *Mucell* e deste modo algumas unidades dos parâmetros são alteradas), adaptada com a tecnologia *Mucell*, na qual foram processadas peças com *Mucell* e sem *Mucell*. No caso das peças injetadas com *Mucell* o gás usado foi o Azoto. O material usado para o estudo das peças foi o PBT de cor branca (cor natural do material) e laranja (não se sabe a quantidade do aditivo de cor usado, uma vez que a mistura do material com o aditivo de cor já se encontrava á bastante tempo na empresa) e PP preto. Para este estudo foram injetadas 10 peças de cada variável de processamento, como está descrito nas Tabela 5, Tabela 6, Tabela 7, dando um total de 120 peças.



Figura 22- Máquina de injeção

Inicialmente, começou-se por definir e verificar alguns parâmetros da máquina até termos o processo afinado. Parâmetros tais como, temperatura de injeção, velocidade de injeção, volume de dosagem, definição da 2ª pressão para as peças sem *Mucell* e pressão de gás necessária para a injeção com *Mucell*, entre outras variáveis que são apresentadas na Tabela 3 e Tabela 4.

Tabela 3-Parâmetros de injeção usados para processar o material PP

| Cor | Preto | | | | |
|---|-------------------|--------|-------------------|--------|--------|
| Sem MuCell® / Com MuCell® | Sem <i>Mucell</i> | | Com <i>Mucell</i> | | |
| gás injetado [%] | 0 | | 7 | 9 | 10 |
| Temperatura de dosagem [°C] | Bico | Zona 1 | Zona 2 | Zona 3 | Zona 4 |
| | 220 | 220 | 215 | 205 | 200 |
| Velocidade de injeção [mm/s] | 25 | | 25 | | |
| Pressão de injeção [MPa] | 11.84 MPa | | 11.3 MPa | | |
| Volume de dosagem [mm] | 66 | | 57.5 | 55.9 | 55.4 |
| 2° Pressão / Pressão da operação do SCF [MPa] | 6.5 | | 21.5 | | |
| Força de fecho (toneladas) | 400 | | 300 | | |
| Tempo de ciclo [s] | 62 | | 38.74 | | |

Tabela 4- Parâmetros de injeção usados para processar o material PBT

| Material PBT | | | | | | | | | | |
|---|-------------------|--------------|-------------------|--------------|-------------------|------------|-------------------|--------------|--------------|--------------|
| Cor | Branco | | | | Laranja | | | | | |
| Sem MuCell® / Com MuCell® | Sem <i>Mucell</i> | | Com <i>Mucell</i> | | Sem <i>Mucell</i> | | Com <i>Mucell</i> | | | |
| Percentagem de gás injetado | 0 | 7 | 8 | 10 | 0 | 9 | 10 | 11 | | |
| Temperatura de dosagem [°C] | Bico 260 | Zona 1 260 | Zona 2 255 | Zona 3 255 | Zona 4 250 | Bico 260 | Zona 1 260 | Zona 2 255 | Zona 3 255 | Zona 4 250 |
| Velocidade de injeção [mm/s] | 35 | | 35 | | 35 | | 35 | | | |
| Pressão de injeção [MPa] | 9 | | 8.8 | | 9 | | 8.8 | | | |
| Volume de dosagem [mm] | 67 | 52 | 51.5 | 51 | 67 | 52 | 51.5 | 51 | | |
| 2º Pressão / Pressão da operação do SCF [MPa] | 4 | | 21.5 | | 4 | | 21.5 | | | |
| Força de fecho [toneladas] | 400 | | 300 | | 400 | | 300 | | | |
| Tempo de ciclo [s] | 50 | | 34 | | 50 | | 34 | | | |

Deu-se início á injeção das primeiras peças sem *Mucell* (injeção sem gás) do material virgem PP Preto, no qual se obteve peças com um peso de $\approx 179g$ e registou-se este valor, uma vez que seria necessário posteriormente para calcular a percentagem de gás que iria ser incorporado nas peças. De

seguida injetaram-se 3 peças recorrendo á tecnologia de *Mucell* e registaram-se valores diferentes e mais baixos no que toca ao peso da peça, tendo um valor $\approx 166g$.

Este valor de peso corresponde a 7% de redução de peso, logo 7% da peça estaria ocupada pelo gás. Injetaram-se 10 peças com esta percentagem.

Repetiu-se este processo novamente até se obter as novas percentagens de incorporação de gás, para os diferentes materiais como se pode ver nas Tabela 5, Tabela 6 e Tabela 7.

Tabela 5- Valores da percentagem conseguida para o material PP na cor Preta.

| | PP PRETO | | | |
|--------------------------------|------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| Percentagem de gás incorporado | S/ <i>Mucell</i> | C/ <i>Mucell</i> 7 % de gás | C/ <i>Mucell</i> 9 % de gás | C/ <i>Mucell</i> 10 % de gás |
| Peso das peças(g) | 179 | 166 | 163 | 161 |
| Nº de moldações | 10 | 10 | 10 | 10 |

Tabela 6- Valores da percentagem conseguida para o material PBT na cor Branca.

| | PBT BRANCO | | | |
|--------------------------------|------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| Percentagem de gás incorporado | S/ <i>Mucell</i> | C/ <i>Mucell</i> 7 % de gás | C/ <i>Mucell</i> 8 % de gás | C/ <i>Mucell</i> 10 % de gás |
| Peso das peças | 222 | 206 | 203 | 200 |
| Nº de moldações | 10 | 10 | 10 | 10 |

Tabela 7- Valores da percentagem conseguida para o material PBT na cor Laranja

| | PBT LARANJA | | | |
|--------------------------------|------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Percentagem de gás incorporado | S/ <i>Mucell</i> | C/ <i>Mucell</i> 9 % de gás | C/ <i>Mucell</i> 10 % de gás | C/ <i>Mucell</i> 11 % de gás |
| Peso das peças | 221 | 201 | 199 | 197 |
| Nº de moldações | 10 | 10 | 10 | 10 |

3.3. Medição da contração da peça em dois pontos

Concluída a injeção, selecionaram-se 3 peças de cada variável de processamento e efetuou-se a medição da contração em dois pontos escolhido na peça no laboratório de metrologia. Com o auxílio do *software Creo view 6.0* pôde-se visualizar e retirar as medições dos dois pontos, um na vertical e outro na horizontal. Os valores representam o valor real dado no molde.

Nos laboratórios de metrologia recorreu-se a uma CMM (Máquina de medição de coordenadas) como demonstrada na Figura 23, e executaram-se a medição dos dois pontos. No final das medições foi elaborado um relatório (anexo 1) onde estão presentes as medições nominais que corresponde ao valor real da peça presente na Figura 24 e as medições que realmente se obteve nas peças injetadas com e sem *Mucell*. Neste relatório é apresentado o valor médio das medições retirados das peças que foram usados para apresentação e discussão dos resultados.



Figura 23- CMM (Máquina de medição de coordenadas).

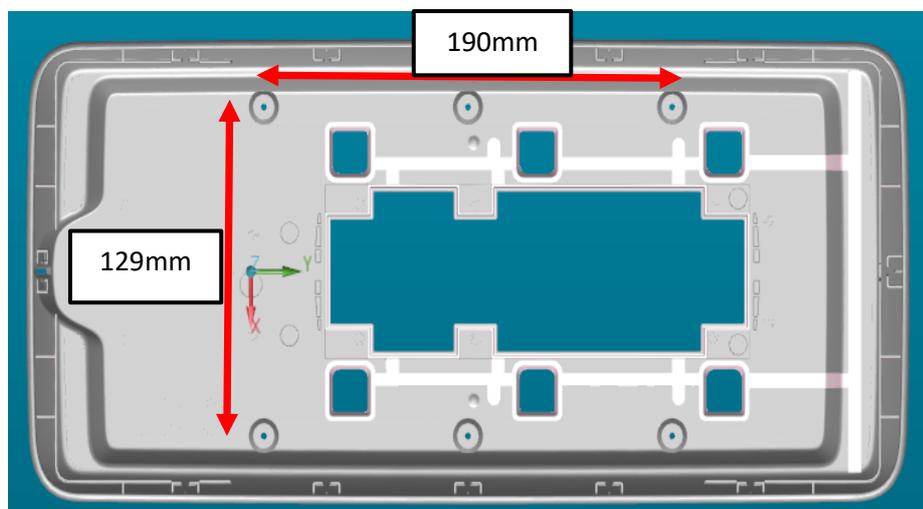


Figura 24- Valores das dimensões dos dois pontos, com o auxílio do software *Creo view 6.0*

3.4. Preparação dos provetes

Posteriormente desenhou-se dois provetes na peça como mostra a Figura 25, (o provete A no sentido perpendicular do fluxo e que se localiza na linha de soldadura onde o fluxo se encontra após a injeção e o provete B no sentido paralelo ao fluxo), com 100mm de altura, 10mm de largura e 2 mm de espessura, numa área da peça que respeitasse as dimensões pretendidas, como demonstrado.

Concluída esta etapa, executou-se o corte dos provetes para a realização dos ensaios mecânicos.

Depois de corte de todos os provetes, numeram-se todos eles para ajudar a diferenciar na fase posterior do trabalho como demonstra a Figura 26.

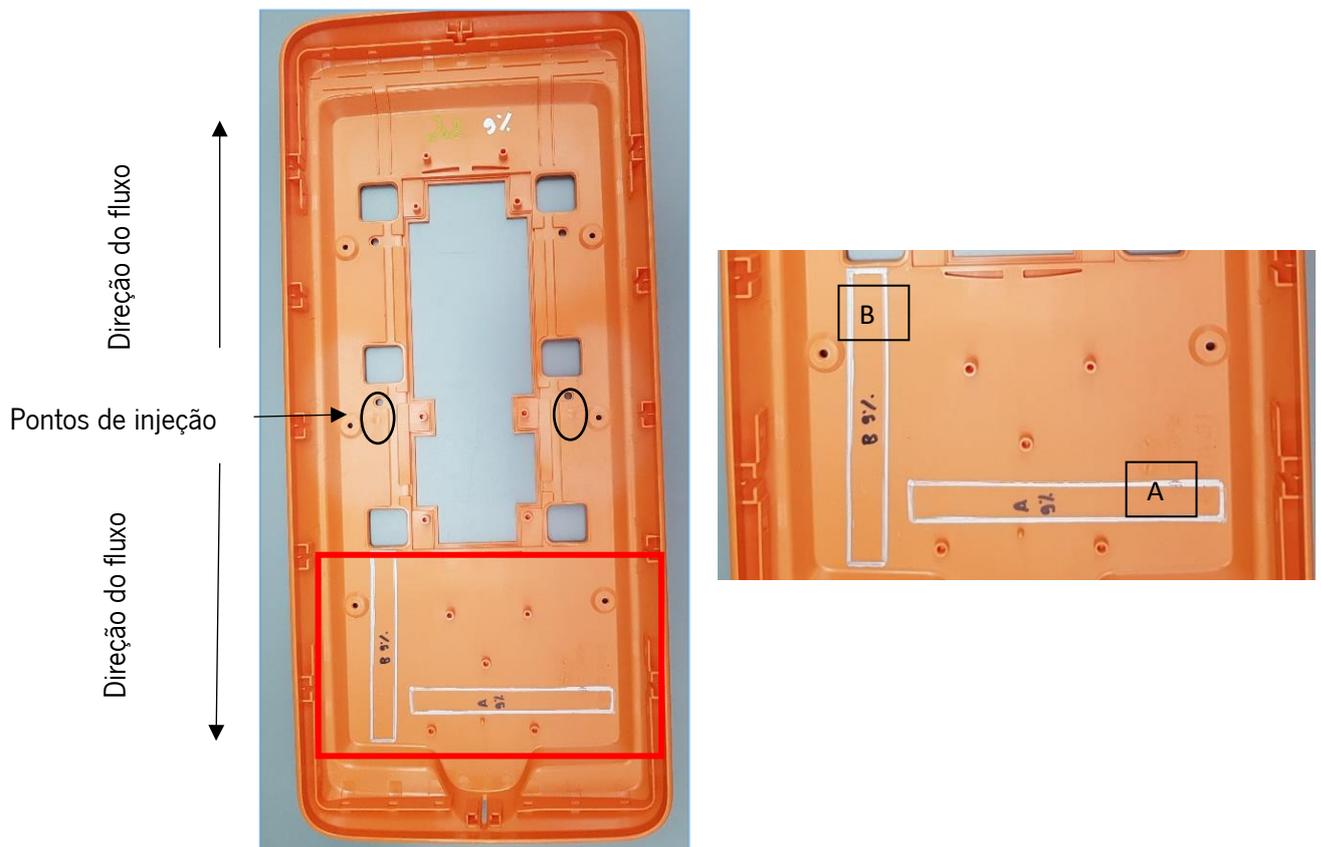


Figura 25-Desenho dos provetes na peça em estudo

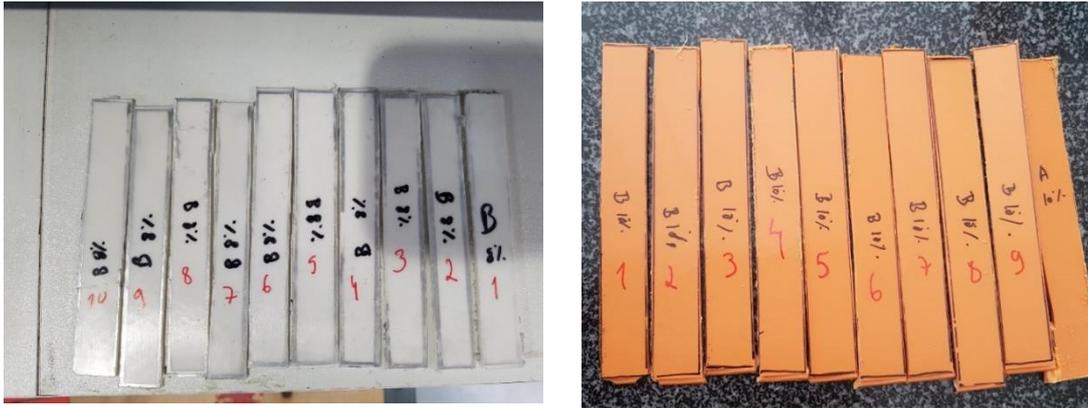


Figura 26- Identificação e corte dos provetes

3.5. Ensaio Mecânicos

Tendo os cortes de todos os provetes executados, deu-se início aos ensaios mecânicos, mais propriamente ao ensaio de flexão em três pontos, que visa avaliar as propriedades mecânicas do material, quando submetido a esforços de flexão e assim determinar o módulo de elasticidade à flexão. O módulo de elasticidade permite medir a rigidez do material, ou seja, é a razão entre a tensão aplicável e a deformação. Para a realização dos ensaios recorreu-se ao laboratório da universidade do Minho.

Este ensaio consistiu na colocação de um provete exposto a uma deflexão a uma determinada velocidade, com uma determinada carga. Antes de cada ensaio executou-se a medição da largura e espessura de cada provete. Os ensaios foram realizados segundo a norma ASTM D638 [29] à temperatura ambiente numa máquina *Instron* 5969 como demonstra a Figura 27.

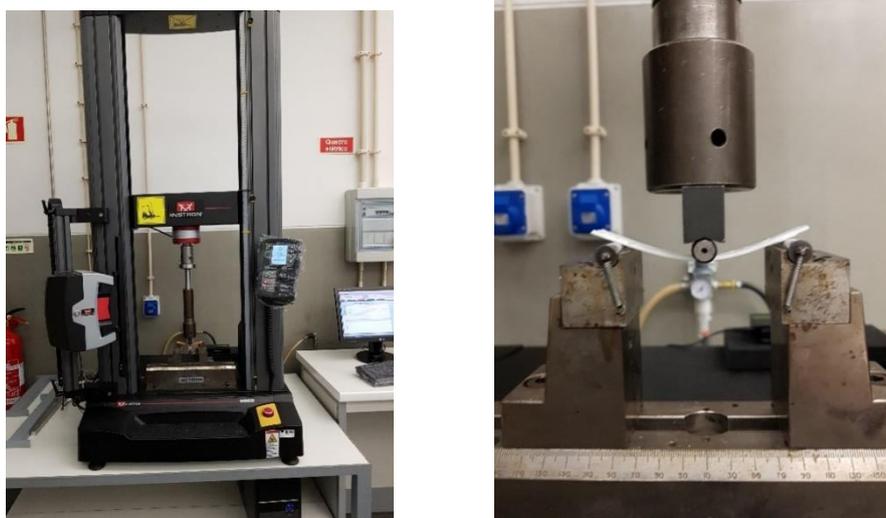


Figura 27- Máquina usada no ensaio de flexão em três pontos

De acordo com as especificações das dimensões normalizadas dos provetes, foram testados dez provetes das diferentes variáveis em estudo, num total de 240 amostras. Num computador que está conectado à máquina impôs-se as condições de ensaio tais como, um deslocamento até 10mm, uma velocidade de 5 mm/min, e na máquina atribui-se uma distância entre apoios de 80 mm, como demonstrado na Figura 28.

Com recurso ao computador pode-se visualizar o deslocamento da curva carga vs deslocamento durante o ensaio, bem como o tratamento e armazenamento dos dados.

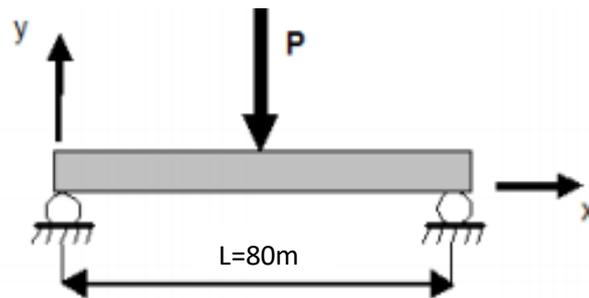


Figura 28-Representação esquemática da deflexão em 3 pontos[18].

Com os dados fornecidos pelo *software*, foi necessário realizar um tratamento de dados, com o propósito de retirarmos o valor do módulo de elasticidade. Através dos valores obtidos pelo software, e com os valores da espessura(d) e largura(b) de cada provete e a distância entre o apoio é possível obter o valor de deformação e da tensão com a utilização das seguintes formulas. Na determinação da deformação foi usada a equação (2):

$$\epsilon = \frac{6Dd}{L^2} \quad (2)$$

Onde: **D** é o deslocamento, o **d** espessura, e o **L²** é a distância entre apoios que será sempre 80mm.

Na determinação da tensão máxima á flexão foi usada a seguinte equação:

$$\sigma_{\max} = \frac{3.P_{\max}.L}{2.b.d^2} \text{ (MPa)} \quad (3)$$

Onde: **P_{max}** é a carga, **L** o comprimento, **b** a largura e **d** a espessura.

De seguida, construiu-se a curva da tensão em função da deformação, de onde se retirou a tensão máxima e se traçou uma reta tangente na zona linear, determinando-se o seu declive e consequentemente o módulo de elasticidade como visualizado na Figura 29.

Elaborou-se um gráfico para cada um dos provetes correspondente a cada variável, de modo a retirar o módulo de elasticidade individual. Posteriormente fez-se uma média com os diferentes módulos de elasticidade e obteve-se o valor médio do módulo de elasticidade de cada variável, Figura 30.

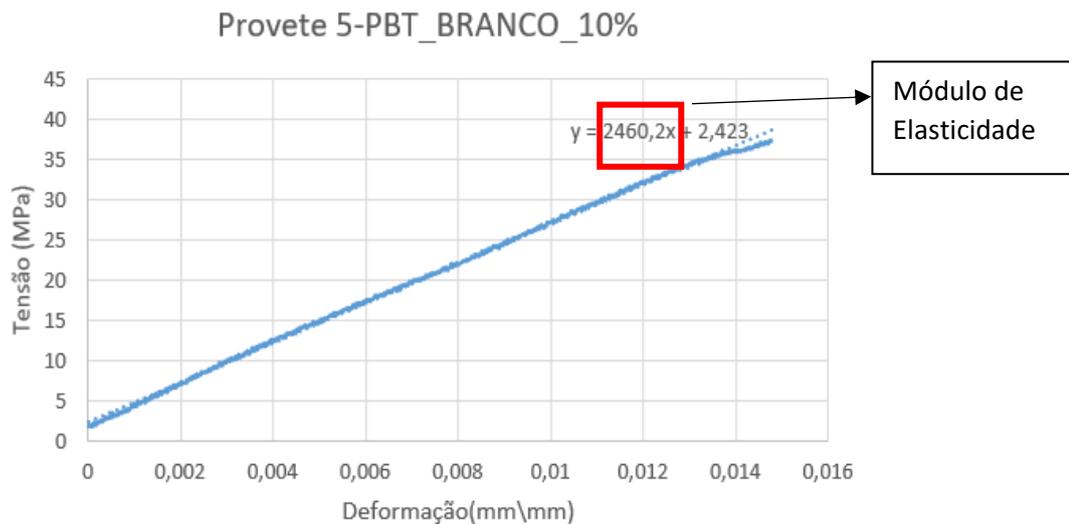


Figura 29-Gráfico do módulo de elasticidade retirado de cada provete testado

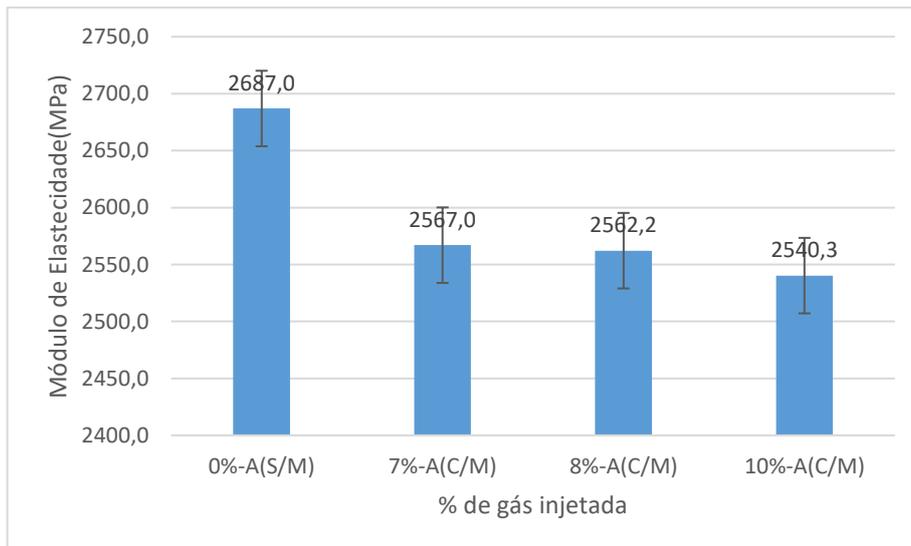


Figura 30- Comparação do módulo de elasticidade do PBT BRANCO provete A.

3.6. Visualização das bolhas

Realizadas todas as tarefas descritas anteriormente, visualizou-se por último as bolhas de ar geradas no interior da peça, provocadas pela introdução de gás derivada da tecnologia *Mucell*.

Recorreu-se ao laboratório de metrologia para o manuseamento de uma máquina de medição multissensor *zeiss o-inspect 322* que permitem a medição perfeita de cada característica, opticamente ou por contato, como é visível na Figura 31, que permite ampliar a área da peça em estudo e retirar conclusões do que se observa. Para este estudo usaram-se os provetes utilizados para os ensaios mecânicos. Partiram-se os provetes e analisou-se a área da região partida do provete como demonstra a Figura 32. É o local onde melhor se observa a formação das bolhas.



Figura 31- Máquina CMM multissensor zeiss o-inspect 322

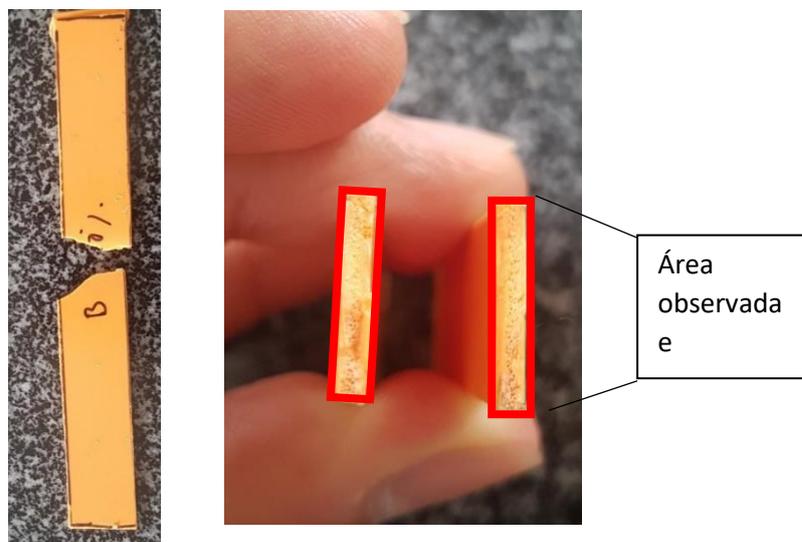


Figura 32- Área analisada para observação das bolhas de gás

Colocaram-se os provetes das diferentes variáveis de processamento por baixo da lente da máquina e com o auxílio de um computador foi possível visualizar a presença das bolhas e retirar fotos. Como demonstra a Figura 33 está presente uma sequência de fotos retiradas de uma das variáveis que neste caso em específico trata-se do PBT cor de laranja sem gás e com gás a 9%, 10% e 11%, onde resulta um aumento de bolhas com o aumento da incorporação de gás. No capítulo 4 serão visualizadas todas as sequências das diferentes variáveis e retiradas as suas conclusões.

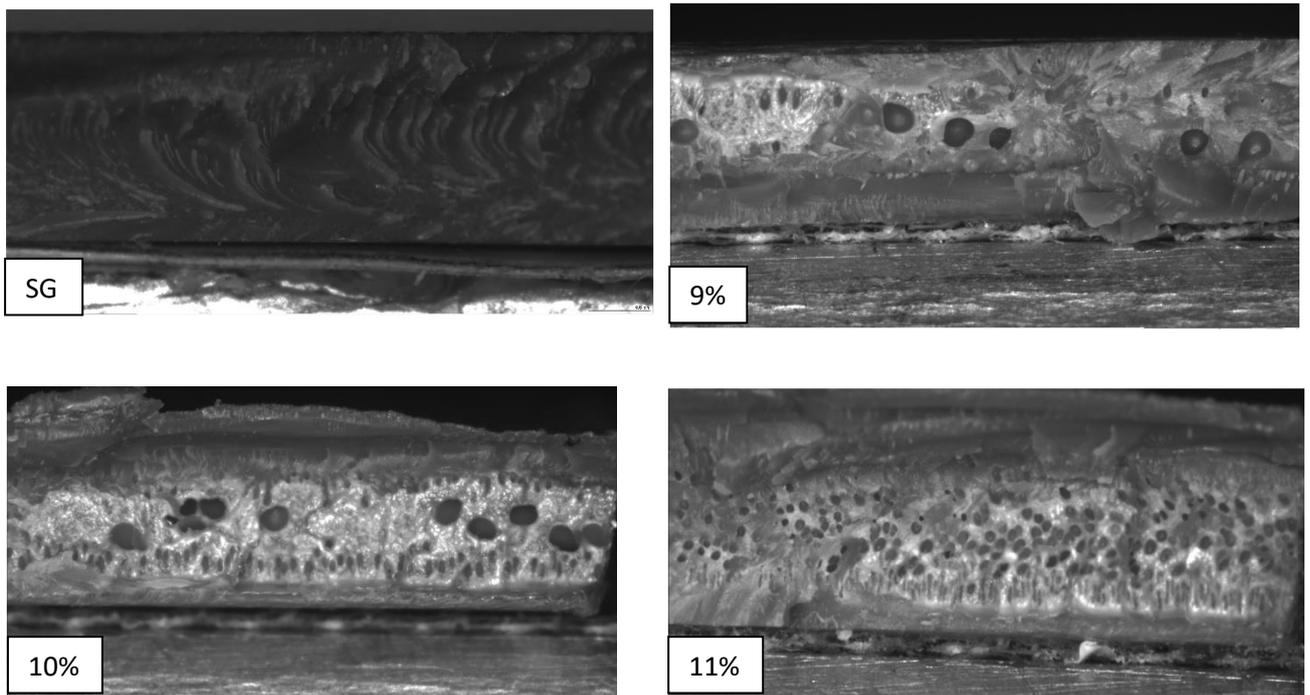


Figura 33-Sequência e Observação das bolhas tendo em conta a percentagem de gás incorporada.

CAPÍTULO 4 – Resultados e análise de resultados

4.1. Comparação injeção com *Mucell* e injeção convencional

Aquando das injeções da peça em estudo, que está apresentada na Figura 34, anotaram-se os valores do tempo de ciclo das peças, peso de peças, entre outras especificações, para cada um dos materiais injetados.

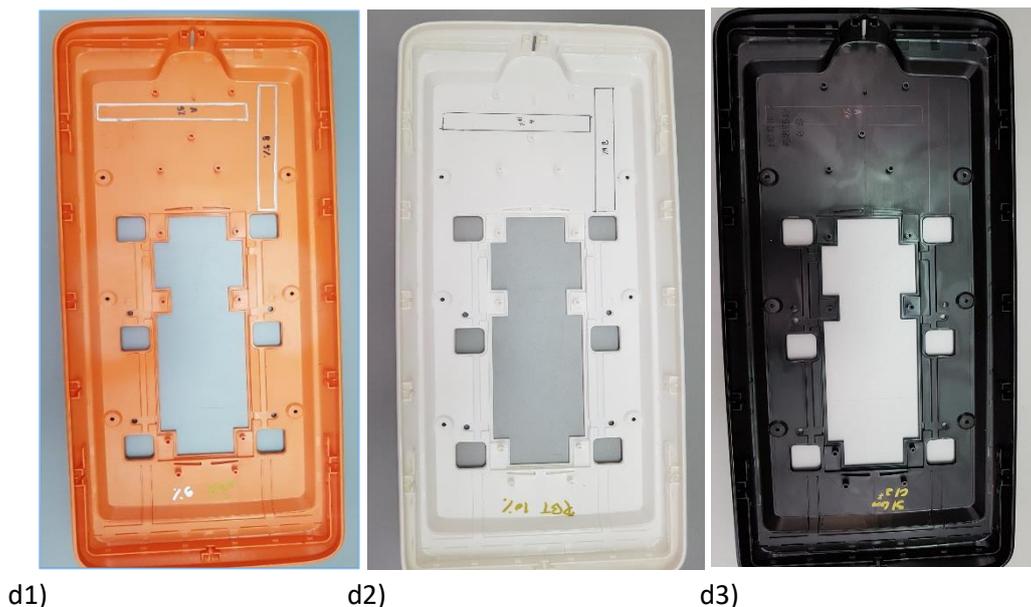


Figura 34-Peça em estudo do ramo automóvel: d1) peça em PBT Laranja; d2) peça em PBT Branco; d3) peça em PP Preto.

4.1.1. Caso PP

No caso das peças em polipropileno injetadas pelo método convencional, obtiveram-se peças com um peso de aproximadamente 179 gramas, um tempo de ciclo de 62s e uma força de fecho de 400 toneladas. Para a injeção com *Mucell* registaram-se pesos com valores compreendidos entre 161-166 gramas, pelo facto de se injetarem diferentes percentagem de gás, um tempo de ciclo de 50s e força de fecho de 300 toneladas, como descrito na Tabela 8.

Tabela 8-Valores de parâmetros do processo de injeção de peças em Polipropileno

| Peça S/ <i>Mucell</i> | Peça C/ <i>Mucell</i> |
|------------------------|---------------------------|
| Peso da peça: ≈179(g) | Peso da peça: ≈161-166(g) |
| Número de cavidades: 1 | Número de cavidades: 1 |
| Tempo de ciclo: 62(s) | Tempo de ciclo: 39(s) |
| Força de fecho: 400(T) | Força de fecho: 300(T) |

Como se pode observar na Tabela 9 e pelo esquema representativo na Figura 35, obteve-se uma redução no tempo de injeção de cerca de 15%. Esta redução deve-se ao facto de ser injetado menos material para dentro do molde, uma vez que o restante material que falta vai ser substituído pelo gás a injetar. Em relação ao tempo da 2ª pressão, no caso de ser injetado com *Mucell*, a segunda pressão e compactação é substituída pela o gás injetado. No que toca ao tempo de arrefecimento, houve uma redução em cerca de 30%, mais uma vez uma diferença bastante significativa, quando usada a tecnologia *Mucell*. Por fim, uma vez que uso do *Mucell* não tem influência nos tempos de abertura e fecho do molde e no tempo de movimentação do robô estes tempos mantêm-se iguais nos dois processos.

Concluiu-se que quando usada a tecnologia *Mucell* obteve-se uma redução no peso da peça compreendida entre os 7% -10%, o que permite economizar matéria-prima, ou seja, pelo mesmo custo de matéria-prima consegue-se produzir ao fim de uma produção de 17 horas com injeção convencional 1000 peças, por sua vez ao injetar com *Mucell*, passasse a produzir 1070-1100, logo a mais 70 a 100 peças. A força de fecho dá máquina diminui-o de 400 para 300 toneladas, e, por fim, conseguiu-se um tempo de ciclo mais rápido em 37%, ou seja, numa produção de 17 horas recorrendo á tecnologia *Mucell* consegue-se passar de uma produção de 1000 peças para 1500 o que nos permite produzir mais peças para o mesmo espaço de tempo.

Tabela 9- Tempo de ciclo detalhado do PP na peça em estudo.

| | PP (Polipropileno) | |
|-------------------------------|--------------------|------------------|
| | S/ <i>Mucell</i> | C/ <i>Mucell</i> |
| Tempo de injeção [s] | 2.66 | 2.27 |
| Tempo de 2º pressão [s] | 9 | — |
| Tempo de arrefecimento [s] | 43 | 30 |
| Tempo de abertura e fecho [s] | 1.8 | 1.8 |
| Tempo do robô [s] | 5 | 5 |
| Total [s] | 62 | 39 |



Redução do tempo de ciclo de 37%

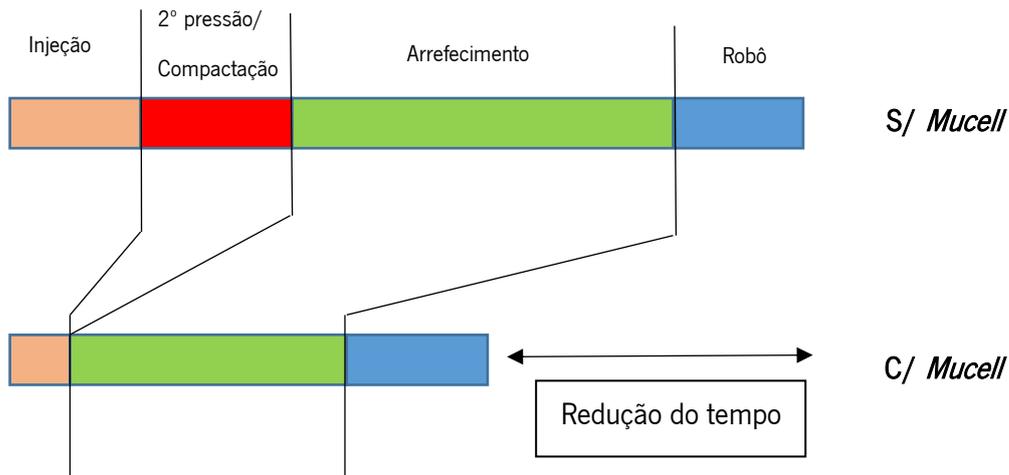


Figura 35- Esquema representativo do tempo economizado quando usada a tecnologia Mucell

4.1.2. Caso PBT

No caso de peças injetadas com PBT sem *Mucell*, obtiveram-se peças com um peso de aproximadamente de 222 gramas para o PBT Branco e de 221 gramas para o PBT Laranja, um tempo de ciclo de 62s e uma força de fecho de 400 toneladas. Para a injeção com *Mucell* do PBT Branco registaram-se para o peso das peças, valores compreendidos entre 200-206 gramas e para o PBT Laranja valores compreendidos entre 197-201 gramas, (valores que variam devido á injeção de diferentes percentagens de gás), um tempo de ciclo de 50s e uma força de fecho de 300 toneladas, como se observa na Tabela 10.

Tabela 10- Valores de parâmetros do processo de injeção de peças em PBT

| Peça S/ <i>Mucell</i> | Peça C/ <i>Mucell</i> |
|---------------------------|-----------------------------------|
| Peso da peça: ≈221/222(g) | Peso da peça: ≈197-201/200-206(g) |
| Número de cavidades: 1 | Número de cavidades: 1 |
| Tempo de ciclo: 50(s) | Tempo de ciclo: 34(s) |
| Força de fecho: 400(T) | Força de fecho: 300(T) |

Como se pode observar pela Tabela 11 e pelo esquema representativo na Figura 36, obteve-se uma redução no tempo de injeção de cerca de 32%, esta redução deve-se ao facto de ser injetado menos material para dentro do molde, uma vez que o restante material que falta vai ser substituído pelo gás a injetar. Obteve-se uma redução no peso da peça compreendida entre os 6% -11%, o que permite economizar matéria-prima, ou seja, pelo mesmo custo de matéria-prima consegue-se produzir ao fim de

uma produção de 17 horas com injeção convencional 1000 peças, por sua vez ao injetar com *Mucell*, passasse a produzir 1070-1100, logo a mais 60 a 110 peças. Em relação ao tempo de 2ª pressão, no caso de ser injetado com *Mucell*, a segunda pressão e compactação é substituída pela o gás injetado. O tempo de arrefecimento teve uma redução em cerca de 21%, mais uma vez uma diferença bastante significativa quando usada a tecnologia *Mucell*. Conseguiu-se um tempo de ciclo mais rápido em 3%, ou seja, numa produção de 17 horas recorrendo á tecnologia Mucell consegue-se passar de uma produção de 1220 peças para 1800 o que nos permite produzir mais peças para o mesmo espaço de tempo.

Por fim, o tempo de abertura e fecho e o tempo do robô mentem-se igual, uma vez que o uso de *Mucell* já não tem influência nestes tempos.

Tabela 11- Tempo de ciclo detalhado do PBT na peça em estudo.

| | PBT poli (tereftalato de butileno) | |
|-------------------------------|------------------------------------|------------------|
| | S/ <i>Mucell</i> | C/ <i>Mucell</i> |
| Tempo de injeção [s] | 1.60 | 1.19 |
| Tempo de 2º pressão [s] | 9 | — |
| Tempo de arrefecimento [s] | 33 | 26 |
| Tempo de abertura e fecho [s] | 1.8 | 1.8 |
| Tempo do robô [s] | 5 | 5 |
| Total [s] | 50 | 34 |


 Redução do tempo de ciclo de 32%

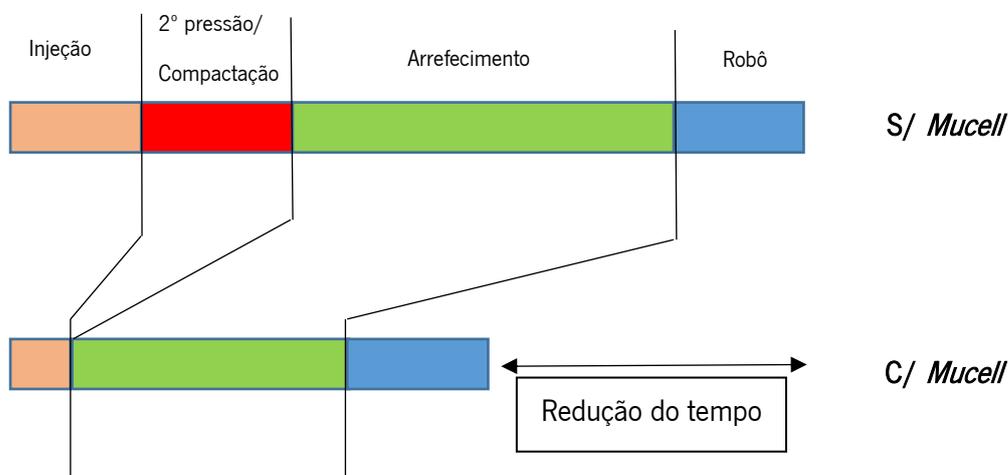


Figura 36- Esquema representativo do tempo economizado quando usada a tecnologia Mucell

Comparando os resultados dos diferentes materiais, verifica-se que ao injetar peças com PP á um ganho superior no tempo de ciclo, com um aumento de 5%. As diferenças entre os tempos de ciclo devem-se ao uso de diferentes matérias-primas, e por vezes a um novo *design* da peça, tornando assim a peça mais fina, o que não é o caso. Olhando paras os tempos de ciclo que se obteve no processamento dos diferentes materiais, torna-se bastante vantajoso injetar com *Mucell*.

4.2. Análise da contração com *Mucell* e sem *Mucell*

Nesta etapa resolveu-se estudar a influência da tecnologia *Mucell* na evolução da contração das peças com aumento da percentagem de gás, comparando as diferentes condições de processamento.

Foram escolhidas duas distâncias para se analisar a contração da peça, uma no eixo do X e outra no eixo dos Y, como se pode verificar na Figura 37. Apó análise dimensional iniciou-se a comparação ilustrada na tabela 12-15. Resultado de uma média de 3 peças escolhidas ao caso.

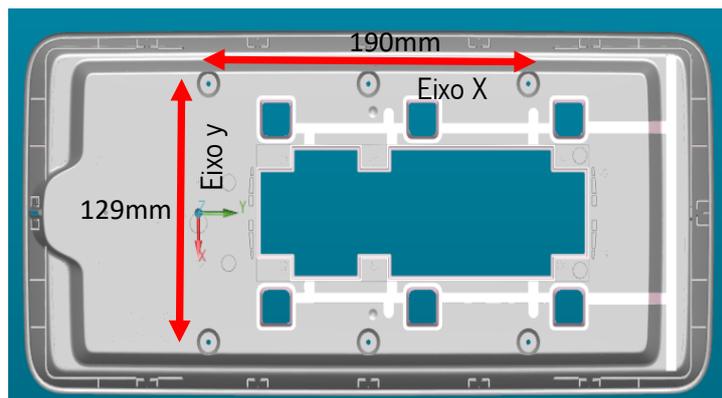


Figura 37- Medição real no molde dos dois pontos escolhidos para avaliar a contração.

Começando por analisar o caso do PBT Laranja, apresentado na Tabela 12, verifica-se que o valor obtido das medições dos dois eixos vai diminuindo, o que leva a uma contração das peças. A peça injetada sem *Mucell* apresentou uma contração na ordem dos 1.40% para o eixo do X e de 1.32% para o eixo do Y, quando se passa a usar a tecnologia *Mucell*, observa-se um aumento contínuo da contração, mas menos significativo. Na transição das peças sem *Mucell* para as com *Mucell* a contração é mais elevada, e entre as peças injetas com *Mucell* a contração é menor. Verifica-se qua para ambos os eixos a contração ocorreu de igual forma, e que entre os 10% e os 11% foi onde ocorreu uma menor contração da peça.

Conclui-se que as peças injetadas com *Mucell* contraíram a mais 0.45% no caso do eixo do X passando de 1.40% para 1.85% e no que toca ao eixo do Y contraiu a mais 0.46% passando de 1.33% para uma contração máxima de 1.79 %, o que se traduz numa contração bastante uniforme.

Tabela 12- Medição de dois pontos, um no eixo do x e outro no eixo do y, para o material PBT Laranja.

| | | PBT LARANJA | | | | |
|----------------|--|-------------|------------|------------|---------|--------|
| | | Molde | S/ MuCell® | C/ MuCell® | | |
| PERCENTAGEM | | ————— | SG | 9% | 10% | 11% |
| EIXO DO X (MM) | | 190 | 187.33 | 186.59 | 186.49 | 186.48 |
| CONTRAÇÃO | | | 1.40% | 0.39% | 0.05% | 0.005% |
| | | | 1.40% → | 1.79% → | 1.84% → | 1.85% |
| EIXO DO Y (MM) | | 129 | 127.29 | 126.80 | 126.72 | 126.70 |
| CONTRAÇÃO | | | 1.33% | 0.38% | 0.06% | 0.015% |
| | | | 1.33% → | 1.71% → | 1.77% → | 1.79% |

Analisando o caso do PBT Branco, apresentado na Tabela 13, obteve-se valores de contração para as peças sem *Mucell* muito próximos ao do PBT Laranja, quando comparados com o valor real dado ao molde. Para o eixo do X temos um valor de contração de 1.37% e para o eixo do Y 1.33% o que seria de espera, uma vez que se trata do mesmo material, apenas muda cor. Quando se passa a usar a tecnologia *Mucell*, observa-se um contínuo aumento da contração, mas menos significativo. Na transição das peças sem *Mucell* para as com *Mucell* a contração é mais elevada e entre as peças injetadas com *Mucell* a contração é menor.

Conclui-se que as peças injetadas com *Mucell* contraíram a mais 0.46% no caso do eixo do X passando de 1.37% para 1.83%, no que toca ao eixo do Y contraiu a mais 0.24% passando de 1.33% para uma contração máxima de 1.57%. Comparando com o PBT Laranja, a contração no eixo do X manteve-se igual na ordem dos 0.46%, já o valor da contração do eixo do Y diminuiu 0.22% o que seria uma melhor opção injetar com o PBT Laranja, uma vez que se obteve uma menor contração.

Tabela 13- Medição de dois pontos, um no eixo do x e outro no eixo do y, para o material PBT Branco.

| PBT BRANCO | | | | | |
|----------------|-------|------------|------------|---------|--------|
| | Molde | S/ MuCell® | C/ MuCell® | | |
| PERCENTAGEM | _____ | SG | 7% | 8% | 10% |
| EIXO DO X (MM) | 190 | 187.38 | 186.92 | 186.89 | 186.50 |
| CONTRAÇÃO | | 1.37% | 0.24% | 0.016% | 0.20% |
| | | 1.37% → | 1.61% → | 1.63% → | 1.83% |
| EIXO DO Y (MM) | 129 | 127.28 | 127.04 | 126.99 | 126.78 |
| CONTRAÇÃO | | 1.33% | 0.18% | 0.039% | 0.016% |
| | | 1.33% → | 1.51% → | 1.55% → | 1.57% |

Visto que os valores das medições retirados do eixo X e Y das peças sem *Mucell* do PBT branco e PBT laranja são muito próximos, variando o seu valor em apenas algumas décimas, resolveu-se organizar os valores das diferentes percentagens de gás obtidas do material PBT, e analisar a contração ocorrida.

Como se pode observar na Tabela 14 o aumento da percentagem de gás, leva a um aumento da contração da peça em ambas as direções. Esta contração é provocada pela diminuição da massa injeção que depois seria compensada pela expansão do gás (azoto). Todavia verifica-se que nesta peça em concreto e nas condições analisadas a diminuição de massa não é suficiente compensada pela expansão do gás que estava num estado de fluido súper crítico e deste modo a contração calculada é maior do que seria de esperar.

Verifica-se que existe um salto bastante significativo da contração na passagem do SG para os 7 % o que já era esperado e entre os 7% e os 8% temos um aumento acentuado na contração, mas nas fases posteriores volta ao normal o prosseguimento da contração.

Tabela 14- Progressão da contração com o aumento da percentagem de gás

| PERCENTAGEM | MOLDE | PBT BRANCO | | | PBT LARANJA | | |
|----------------|-------|------------|--------|--------|-------------|--------|--------|
| | | SG | 7% | 8% | 9% | 10% | 11% |
| EIXO DO X | 190 | 187.38 | 186.92 | 186.89 | 186.59 | 186.49 | 186.48 |
| CONTRAÇÃO (MM) | | | | | | | |
| EIXO DO Y | 129 | 127.28 | 127.04 | 126.99 | 126.80 | 126.72 | 126.70 |
| CONTRAÇÃO (MM) | | | | | | | |

Analisando por último o caso do PP, apresentado na Tabela 15, verificam-se valores de contração mais baixos comparados com os analisados anteriormente. Para o eixo do X temos um valor de contração na ordem dos 0.67% e para o eixo do Y 0.48% quando comparado com os valores reais do molde. Quando se passa a usar a tecnologia *Mucell*, ou seja, observa-se um continuo aumento da contração, mas menos significativo. Na transição das peças sem *Mucell* para as com *Mucell* a contração é mais elevada e entre as peças injetadas com *Mucell* a contração é bastante menor. Verifica-se que a contração ao longo das peças injetadas com *Mucell* em ambos os eixos é praticamente nula, sendo que a peça contrai na ordem das centésimas.

As peças injetadas com *Mucell* contraíram a mais 0.30% no caso do eixo do X passando de 0.67% para 0.97%, no que toca ao eixo do Y também contraiu 0.30% passando de 0.48% para os 0.78%.

Comparando os 3 casos analisados, o melhor material para injetar a peça em estudo a nível de menor contração é o PP. Obteve-se menores percentagem de contração em todas as etapas realizadas das diferentes percentagens de gás e mesmo na peça S/ *Mucell* apresentou uma contração menor.

Tabela 15- Medição de dois pontos, um no eixo do x e outro no eixo do y, para o material PP Preto.

| PP PRETO | | | | | |
|-------------|-------|------------|------------|--------|--------|
| | Molde | S/ MuCell® | C/ MuCell® | | |
| PERCENTAGEM | ————— | SG | 7% | 9% | 10% |
| EIXO DO X | 190 | 188.72 | 188.18 | 188.16 | 188.14 |
| | | 0.67% | 0.28% | 0.010% | 0.011% |
| | | 0.67% | 0.95% | 0.96% | 0.97% |
| EIXO DO Y | 129 | 128.37 | 128.02 | 128 | 127.98 |
| | | 0.48% | 0.27% | 0.016 | 0.015% |
| | | 0.48% | 0.75% | 0.77% | 0.78% |

4.3. Ensaio mecânico de flexão em 3 pontos

Nesta etapa foram usados 20 provetes de cada variável, isto é, termoplásticos de PBT e PP injetado com diferentes percentagens de Azoto, totalizando 240 provetes para teste. Utilizaram-se provetes A que correspondentes ao sentido perpendicular do fluxo e 10 provetes B que correspondentes ao sentido paralelo do fluxo, que foram sujeitos ao ensaio estático de flexão em 3 pontos por forma a determinar as propriedades mecânicas, como se pode visualizar na Figura 38. Como resultado destes ensaios, foram obtidos os valores do módulo de elasticidade para os diferentes materiais e orientação dos provetes. Os valores aqui apresentados resultam da média dos diferentes módulos de elasticidade de cada variável.

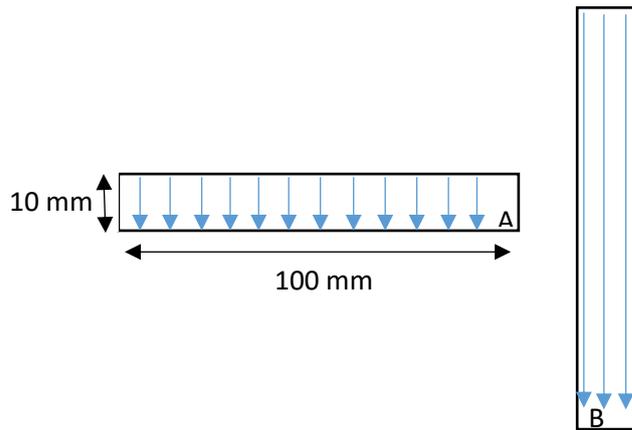


Figura 38-Orientação dos provetes em estudo

Nas Figuras 39-44 abaixo são apresentados os resultados relativos aos valores do módulo de elasticidade resultantes da construção de uma curva da tensão em função da deformação, onde posteriormente se traçou uma reta tangente na zona linear, determinando o seu declive e consequentemente o módulo de elasticidade, para os diferentes materiais processados com e sem gás.

Começando pelo caso do PBT Branco, apresentado na Figura 39, os módulos de elasticidade correspondentes ao provete A (sentido perpendicular ao fluxo), das diferentes etapas com e sem a tecnologia *Mucell*. É notável que obtemos um maior módulo de elasticidade para o caso sem *Mucell* (0%-SG), e que para os casos que se injetou com a tecnologia *Mucell* temos um menor módulo de elasticidade, o que seria de esperar uma vez que as peças injetadas com gás apresentam ar no seu interior, o que torna a peça menos rígida. Os valores apresentados das peças com *Mucell* estão todos muito próximos, logo, injetar com qualquer uma das percentagens de gás não diferenciará.

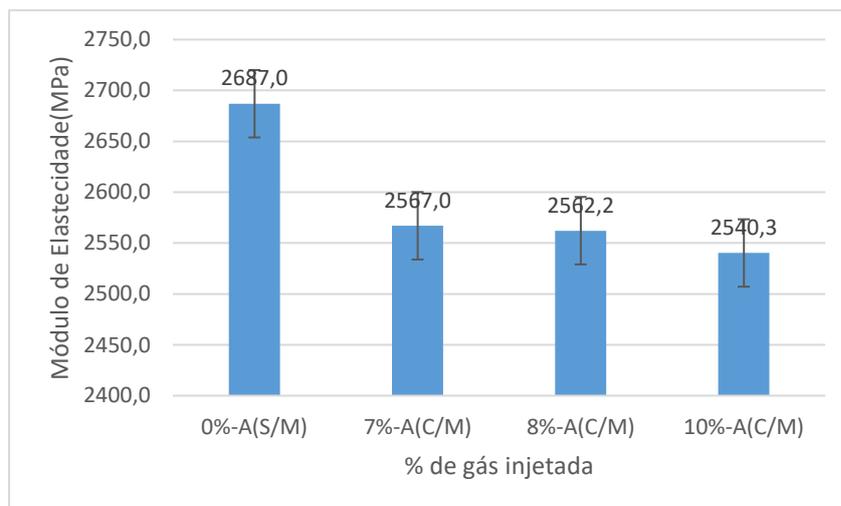


Figura 39- Comparação do modulo de elasticidade do PBT BRANCO provete A.

Analisando novamente o PBT Branco, mas agora referente aos provetes B (sentido paralelo do fluxo), como demonstra a Figura 40, verifica-se mais uma vez, que o módulo de elasticidade da peça sem *Mucell* (0%-SG) apresenta um valor superior, quando comparado com as peças injetas com *MuCell*.

Verifica-se novamente que o valor do módulo de elasticidade da peça sem *Mucell* (0%-SG) é superior aos das peças com *Mucell*, no entanto o seu valor está muito próximo do valor do módulo de elasticidade dos 7% e 8%. Comparando os valores do módulo de elasticidade das peças injetas com *Mucell* observam-se valores muito próximos entre si, no caso dos 7% e 8%. No caso dos 10% afasta-se um pouco, provavelmente pelo facto da transição se ter dado um salto dos 8% para os 10%.

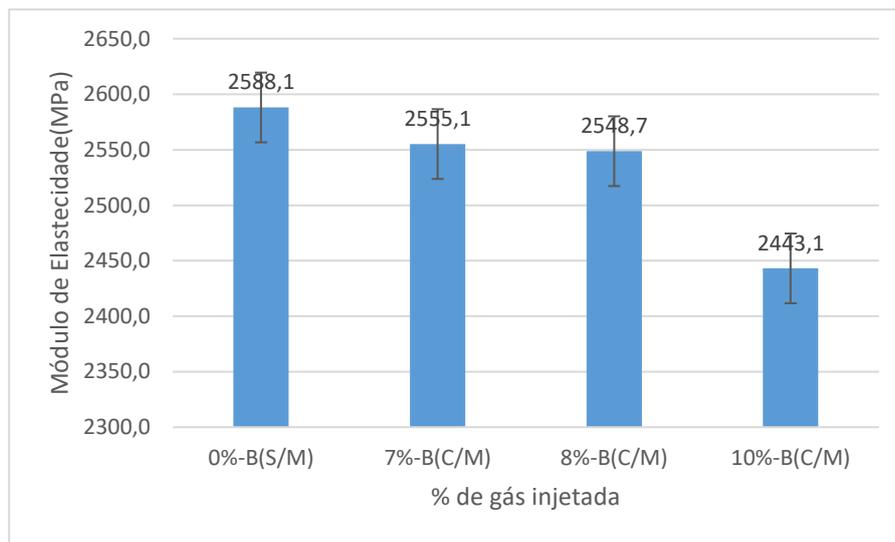


Figura 40- Comparação do modulo de elasticidade do PBT BRANCO provete B

Para concluir, os provetes A (sentido perpendicular ao fluxo) com e sem *MuCell* apresentam um melhor desempenho mecânico quando comparados com os provetes B. No que toca a comparar peças com e sem *MuCell*, em ambos os provetes nota-se uma diminuição do módulo de elasticidade quando se injeta gás.

Analisando agora os provetes A do PBT laranja, apresentados na Figura 41, é visivelmente notável que ocorreu uma diminuição do módulo de elasticidade ao longo do gráfico. Verifica-se que o módulo de elasticidade da variável sem *MuCell* é superior quando comparado com as variáveis dos provetes com *MuCell* e que o módulo das variáveis com *MuCell* tem uma ligeira diminuição linear.

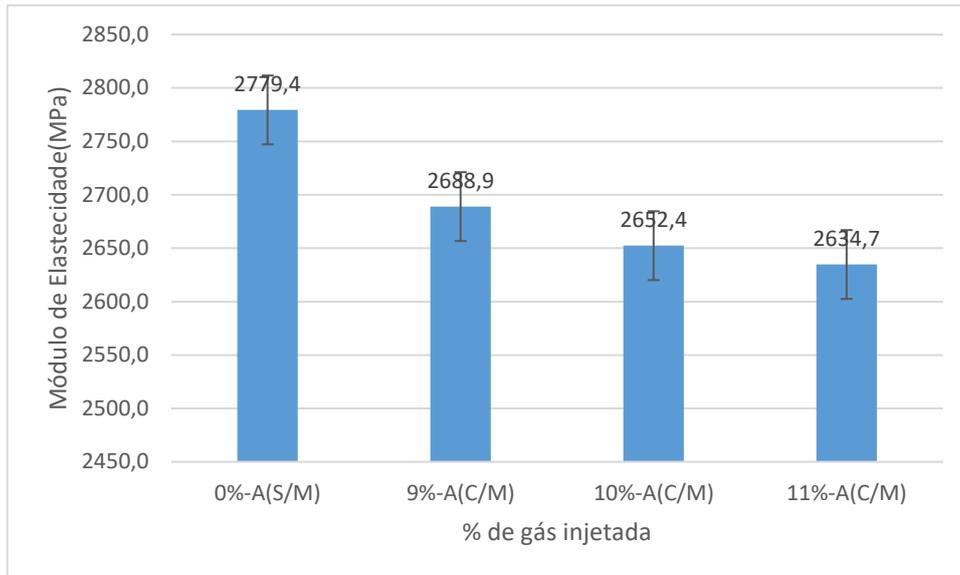


Figura 41- Comparação do modulo de elasticidade do PBT LARANJA provete A

Analisando os provetes B do PBT Laranja apresentado na Figura 42, verifica-se mais uma vez que o valor do módulo de elasticidade dos provetes sem *MuCell* é superior aos do com *MuCell* o que era esperado. Observando os valores dos módulos dos provetes com *MuCell* nota-se uma discrepância da passagem dos 9% para os 10% e 11% na ordem dos 400 MPa, logo á partida, injetar peças com 10% e 11% não seria uma boa opção, no que toca a nível de resistência mecânica. Já o valor do modulo de elasticidade do provete com 9% de gás está bem mais próximo do valor do provete.

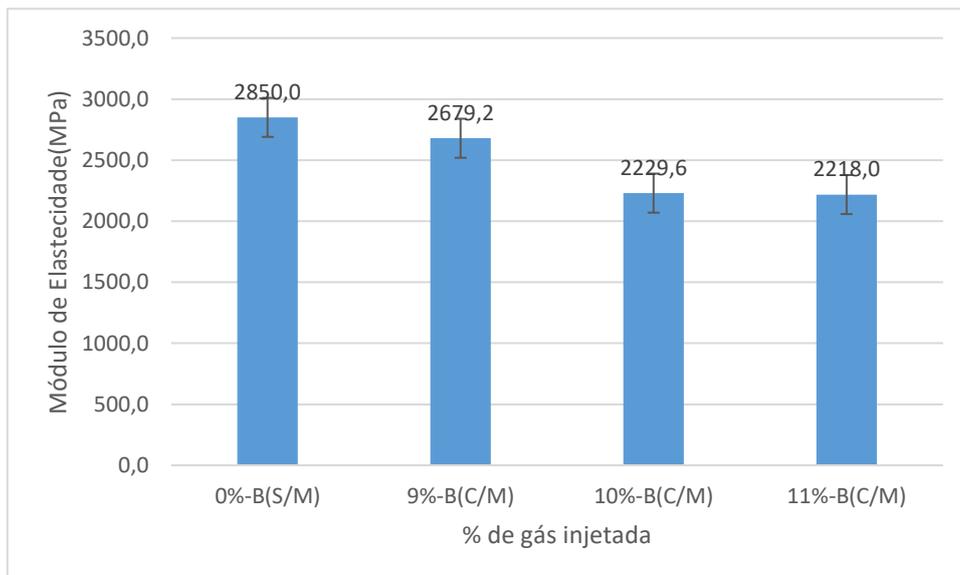


Figura 42- Comparação do modulo de elasticidade do PBT LARANJA provete B

Em Suma, as variáveis sem *MuCell* e com *MuCell* de 9% dos provetes B apresentam um maior módulo de elasticidade quando comparados com os provetes A, no entanto para as variáveis com *MuCell* dos provetes B de 10% e 11% apresentam um valor inferior aos do provete A, isto não seria de esperar pelo facto que os provetes B (sentido do fluxo) apresentaram melhores resultados em todas as variáveis.

Por último, passamos para a análise do Polipropileno. Observando os provetes A do PP apresentados na Figura 43, constata-se mais uma vez que o valor do módulo de elasticidade do provete sem *MuCell* é superior aos dos provetes injetados com *MuCell*. É notável uma diferença do valor do módulo entre o provete sem *MuCell* e o provete com *MuCell* de 10%, logo a partida injetar com 10 % de gás não seria uma boa opção. Verifica-se ainda, que a diferença dos valores do modulo de elasticidade da passagem dos 9% para os 10% é superior á passagem dos 7% para os 9%, tendo em conta que na fase de transição dos 7% para os 9% temos um salto de 2 % a mais, uma vez que não temos a variável de 8%.

O que mais se aproxima do valor do modulo de elasticidade da peça sem *MuCell* é o provete injetado com 7% de gás o que seria a melhor escolha a optar por com *MuCell*.

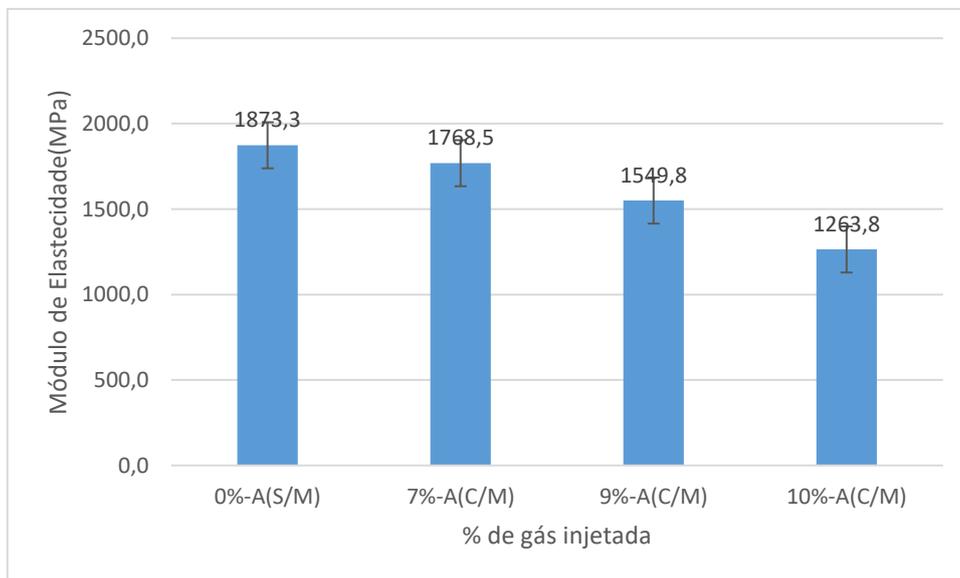


Figura 43- Comparação do modulo de elasticidade do PP provete A

Por fim, apresentados na Figura 44 estão os valores do módulo de elasticidade dos provetes B do Polipropileno. Mais uma vez, assistimos a um decréscimo do módulo de elasticidade ao longo das diferentes variáveis em estudo, e que o módulo da peça sem *MuCell* é superior ao das peças com Azoto

Verifica-se que o valor do módulo para os 7% e 9% é muito próximo do módulo de elasticidade das peças sem *MuCell*, o que seriam ambas uma boa opção a nível de resistência mecânica. No entanto, o valor obtido para os 10% diminui como se verifica no gráfico. Contudo o valor do módulo de elasticidade está muito próximo do valor do módulo de elasticidade do provete S/ *MuCell*.

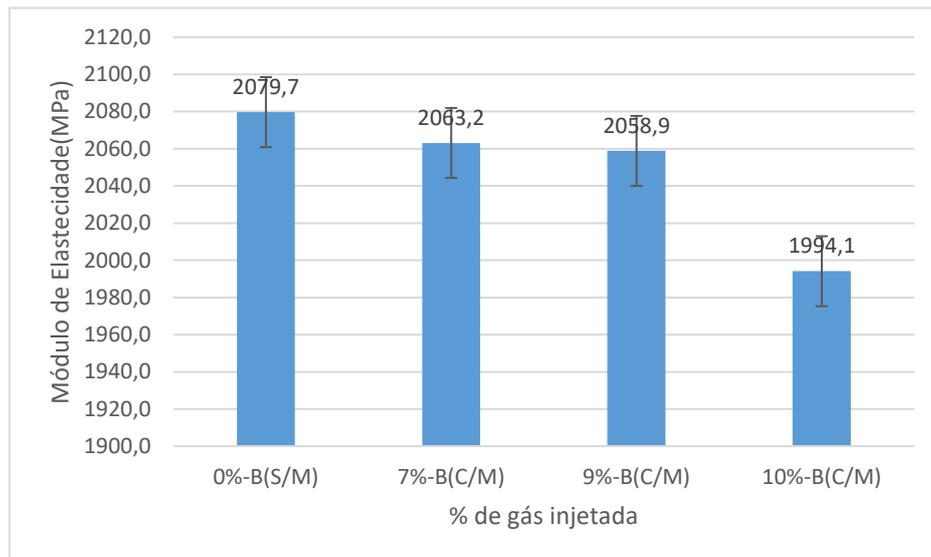


Figura 44- Comparação do módulo de elasticidade do PP provete B

Comparando os provetes A e B do PP, verifica-se uma diferença de valores dos módulos de elasticidade. Para os provetes A ronda entre os 1900 e os 1200MPa, já os valores dos provetes B rondam os valores dos 2000 MPa, o que seria esperável era que rondassem os mesmos valores e isso não se verificou. Nos provetes B obteve-se valores mais próximos entre si em todas as variáveis quando comparados com os provetes A, que obtiveram valores bastante dispares.

Em suma, entre o PBT Branco, PBT Laranja e PP o que apresenta um maior módulo de elasticidade em todas as variáveis analisadas, é o PBT laranja logo, é que oferece uma melhor resistência mecânica. É de salientar que a única diferença entre os dois casos é o aditivo de cor.

4.4. Formação das bolhas de gás

De forma a analisar a estrutura das bolhas do inteiro das peças criadas pela tecnologia *MuCell*, foram fraturados e observados os provetes usados para os ensaios mecânicos. Da análise das várias fotos que foram tiradas das diferentes variáveis selecionou-se uma foto representativa do processo de injeção. Observando a Figura 45 é possível visualizar 3 zonas distintas:

- Camada superficial de polímero – encontra-se em contacto com o molde, esta camada está presente nas duas extremidades da zona analisada;
- Zona intermédia - onde ocorre alguma deformação das bolhas pequenas;
- Zona de expansão de gás - onde o gás tem maior liberdade para se expandir e desenvolver as bolhas.

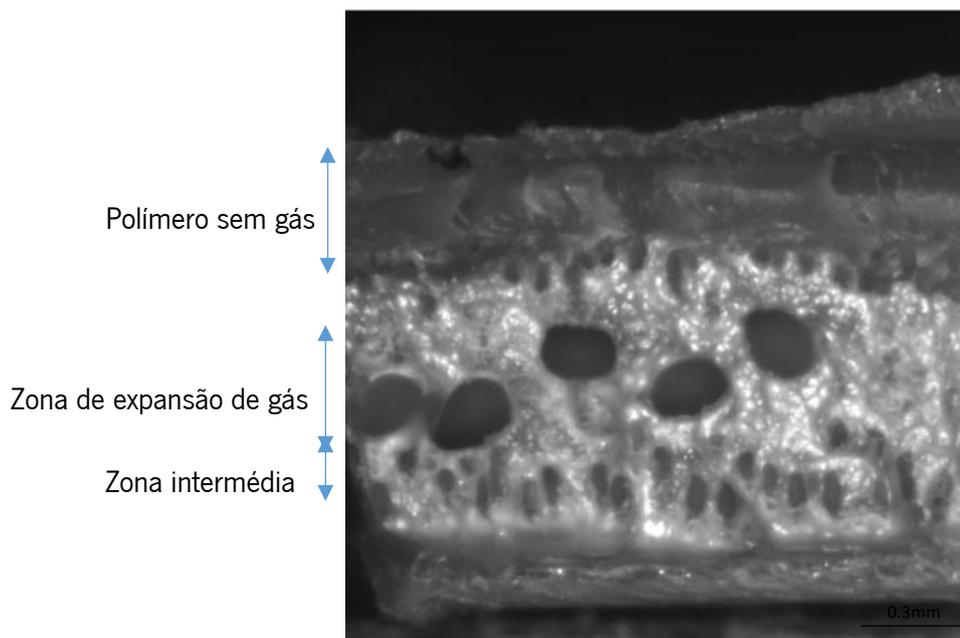
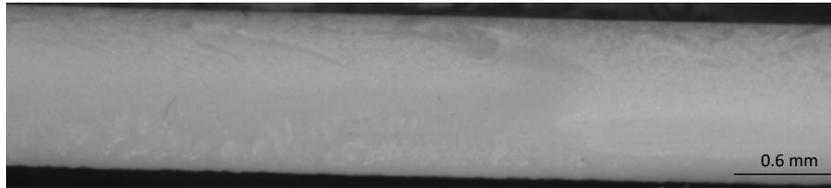


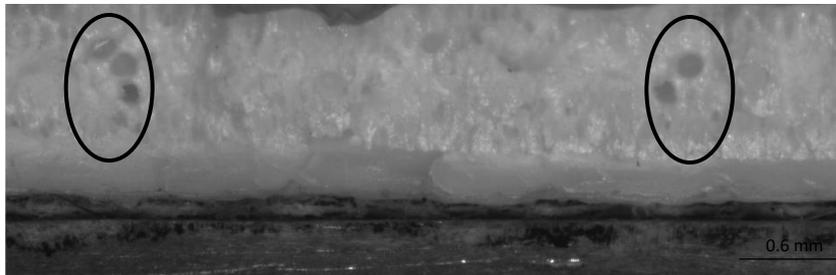
Figura 45- Recorte da secção de uma amostra processada por injeção com recurso à tecnologia *MuCell*

Na Figura 46, encontram-se as fotos das superfícies dos provetes do PBT Branco com as diferentes variáveis em estudo sem *Mucell* e com *Mucell* (7%, 8% e 10%). É possível observar, embora com um pouco de dificuldade pelo facto de o material ser branco, que com o aumento da percentagem de gás, temos um maior número de bolhas de gás, mas ao mesmo tempo são cada vez mais pequenas. Neste caso particular existe a presença de poucas bolhas em qualquer variável injetada C/ *Mucell*.

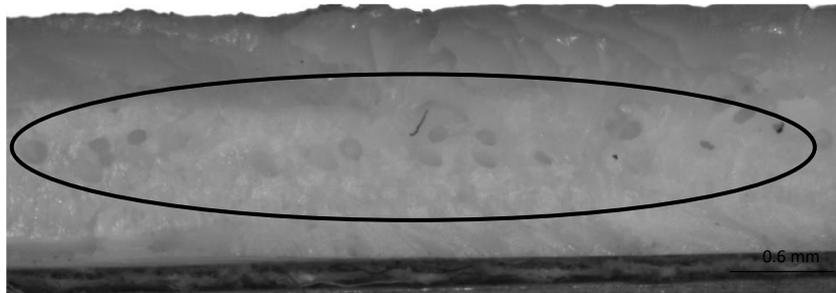
Observa-se que na imagem a) não se visualiza a presença de bolhas pelo facto de não se ter injetado gás, já nas imagens b) c) e d) é notável a presença de bolhas devido á injeção de gás. As imagens c) e d) apresentam um aumento do número de bolhas e com um diâmetro inferior, quando comparado com as bolhas da imagem b) o que leva uma diminuição do peso da peça e a uma menor resistência mecânica, tal com já foi comprovado nos ensaios mecânicos anteriores.



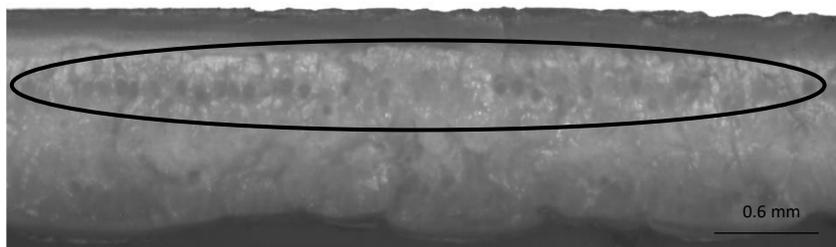
a) SG (0%)



b) 7%



c) 8%



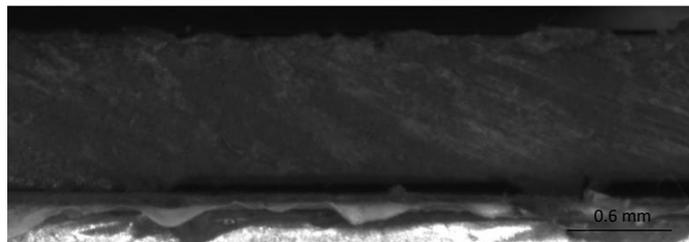
d) 10%

Figura 46- Fotos relativas às superfícies dos provetes de PBT Branco das diferentes variáveis em estudo Sem Mucell e com Mucell (7%, 8% e 10%).

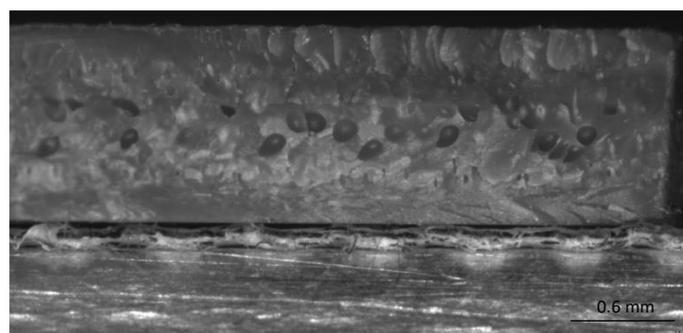
Como se pode visualizar Figura 47, estão apresentadas as fotos das superfícies dos provetes do PBT Laranja com as diferentes variáveis em estudo sem *Mucell* e com *Mucell* (9%, 10% e 11%). É possível observar e com bastante clareza, que com o aumento da percentagem de gás, temos um aumento bastante notório no número de bolhas de gás, mas ao mesmo tempo vão diminuindo o seu diâmetro. Este aumento do número de bolhas leva conseqüentemente a uma diminuição da resistência mecânica.

Observa-se que na imagem e) não existe a presença de bolhas, já nas imagens f) g) e h) é notável a presença de bolhas devido á injeção de gás. As imagens g) e h) apresentam um aumento do número de bolhas e com um diâmetro inferior quando comparado com as bolhas da imagem b) no entanto a imagem g) ainda apresenta alguma bolhas com um diâmetro idêntico ao da imagem f).

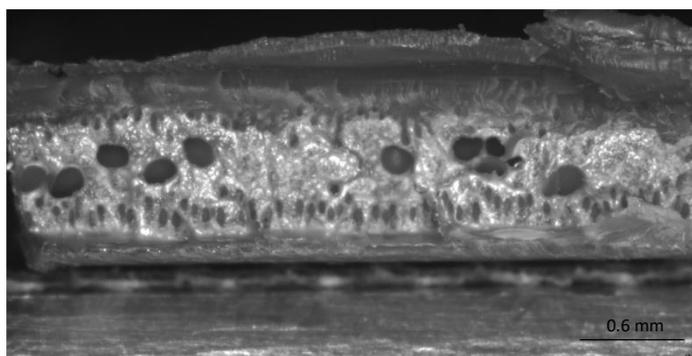
Este aumento do número de bolhas com o aumento de injeção de gás, leva uma diminuição do peso da peça e a um menor módulo de elasticidade, tal com já foi comprovado nos ensaios mecânicos no capítulo anterior.



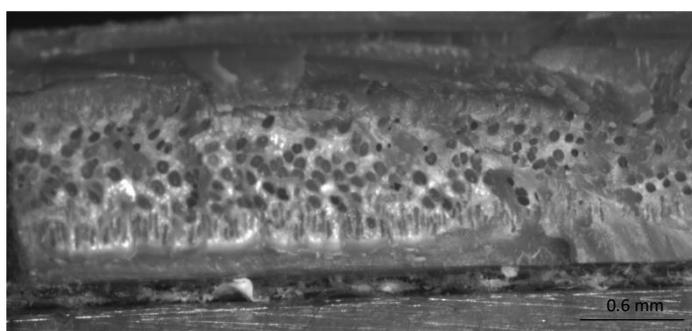
e) SG (0%)



f) 9%



g) 10%



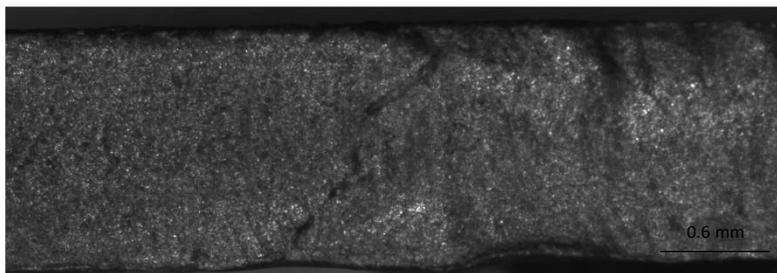
h) 11%

Figura 47- Fotos relativas às superfícies dos provetes de PBT Laranjos das diferentes variáveis em estudo Sem Mucell e com Mucell (9%, 10% e 11%).

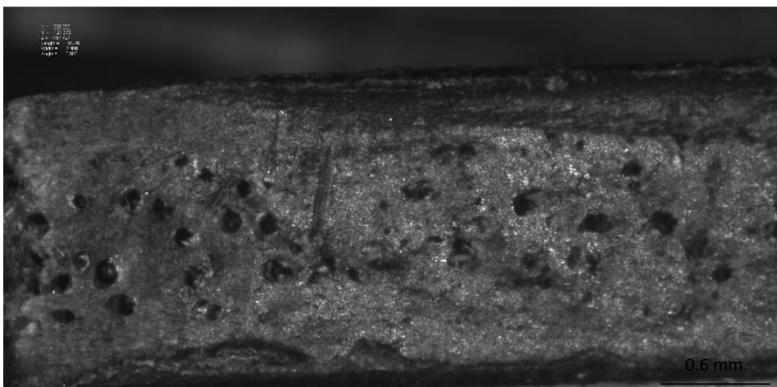
Como se pode visualizar na Figura 48, estão apresentadas as fotos das superfícies dos provetes do PP Preto com as diferentes variáveis em estudo sem *Mucell* e com *Mucell* (7%, 9% e 10%). É possível observar, mas com um pouco de dificuldades devido a bolhas irregulares e a uma má dispersão das mesmas, que com o aumento da percentagem de gás, temos um aumento do número de bolhas que ao mesmo tempo vão diminuindo o seu diâmetro. Este aumento do número de bolhas leva consequentemente a uma diminuição da resistência mecânica.

Observa-se que na imagem i) não existe a presença de bolhas, já nas imagens j) k) e l) é notável a presença de bolhas devido á injeção de gás. As imagens k) e l) apresentam um aumento do número de bolhas com um diâmetro inferior. Comparando a imagem l) com a k), verifica-se um aumento do número de bolhas, no entanto o diâmetro de algumas bolhas é maior do que as bolhas apresentadas na imagem k).

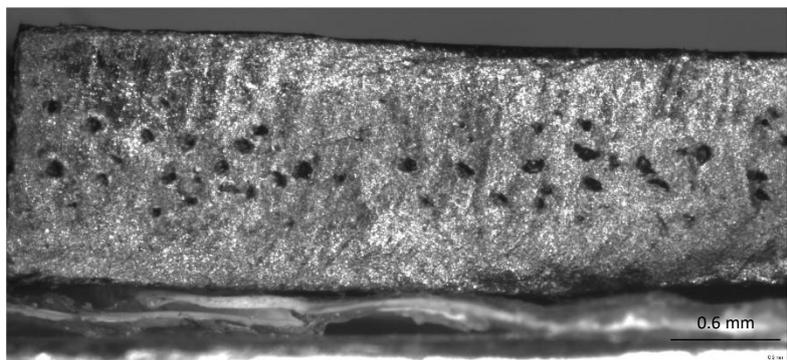
Este aumento do número de bolhas com o aumento de injeção de gás, leva uma diminuição do peso da peça e a um menor módulo de elasticidade, tal com já foi comprovado nos ensaios mecânicos no capítulo anterior.



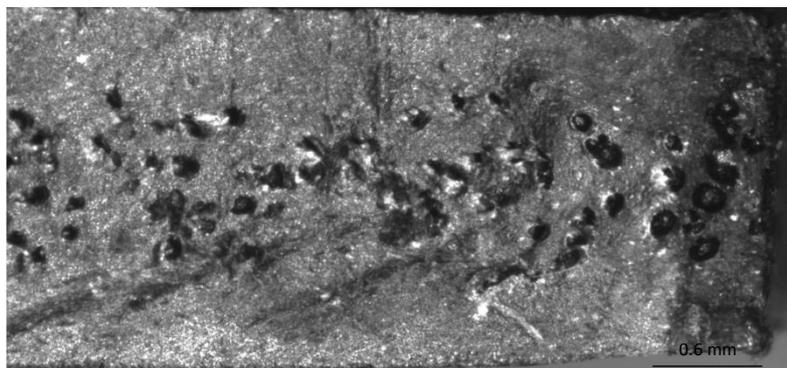
i) SG (0%)



k) 7%



l) 9%



j) 10%

Figura 48- Fotos relativas às superfícies dos provetes de PP Preto das diferentes variáveis em estudo Sem Mucell e com Mucell (7%, 9% e 10%).

4.5. Peso da peça Vs Contração

Realizado o estudo da contração nas peças injetas com *Mucell* segundo as diferentes percentagens de gás injetadas para os diferentes materiais, decidiu-se analisar o cruzamento de duas variáveis, tais como o peso e a contração, em função do aumento da percentagem de gás injetado quando usada a tecnologia *Mucell* e ao mesmo tempo observar a quantidade e o tamanho das bolhas. Para os valores do peso, escolheu-se aleatoriamente 3 peças de cada variável e executou-se uma média de valores que serão os apresentados nos gráficos 49-51. Para o caso dos valores da contração apresentados, optou-se por escolher os valores retirados do eixo X de cada variável que foram retirados do separador contração.

Analisando o caso do PBT Branco, verifica-se na Figura 49 que quando processamos as peças com *Mucell*, ou seja, quando injetamos gás juntamente com o material polimérico, ocorrem alterações a nível da contração e do peso da peça. Observando a linha azul, correspondente à contração do material, vemos um aumento progressivo da contração com o aumento da percentagem de gás e ao mesmo tempo visualizamos uma linha laranja, que corresponde ao peso da peça, a diminuir linearmente com o aumento da percentagem de gás o que seria esperado, pois a peça contém mais ar no seu interior que é representado pelas bolhas de ar, como se pode ver nas fotos.

Ambas as linhas se cruzam na passagem de sem *Mucell* para com *Mucell*, uma vez que é neste exato momento que se começam a observar as alterações provocadas pelo processamento com a tecnologia *Mucell*. Na passagem dos 8% para os 10% é notável um aumento da contração, no entanto a diminuição do peso das peças mantém-se linear e com uma economia de peso entre os 7% e os 10%.

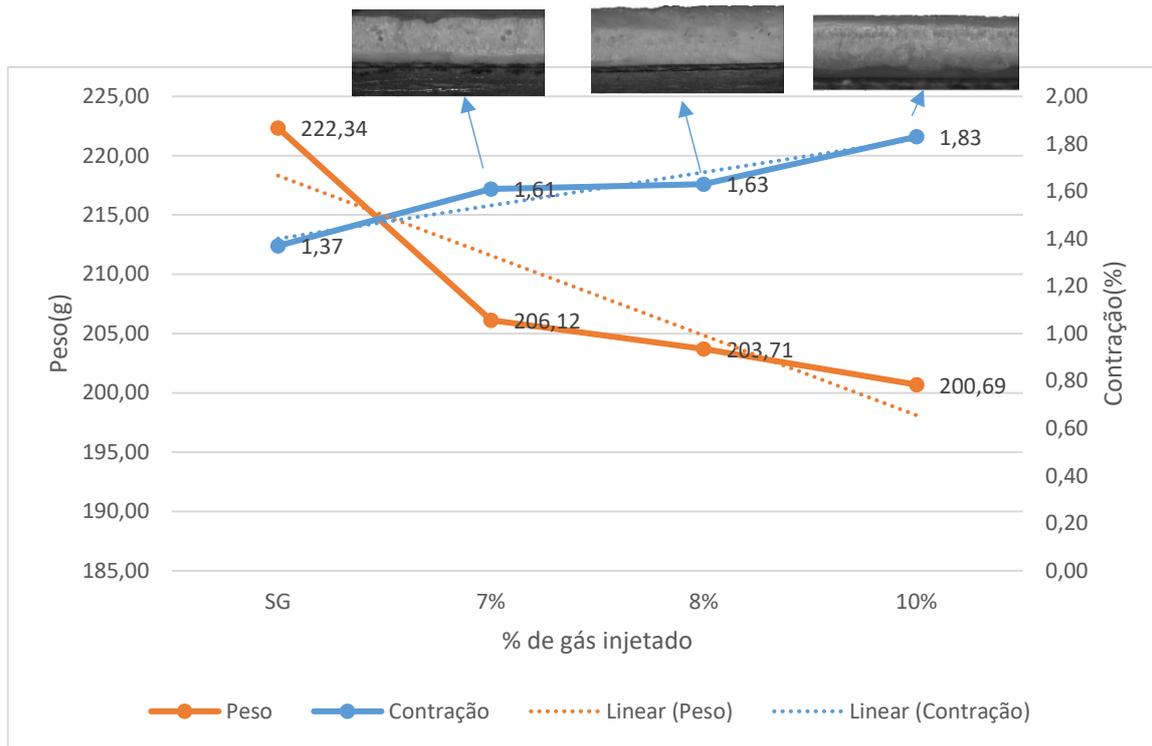


Figura 49- Análise do peso do peso Vs Contração do PBT Branco

No PBT Laranja, verifica-se na Figura 50 que quando processamos as peças com *Mucell*, ou seja, quando injetamos gás juntamente com o material polimérico ocorrem alterações a nível da contração e do peso da peça. Observando a linha azul, correspondente á contração do material, vemos um aumento pouco notório da contração com o aumento da percentagem de gás e ao mesmo tempo visualizamos uma linha laranja, correspondente ao peso da peça, que vai diminuindo com o aumento da percentagem de gás.

A diminuição peso da peça (diminuição da massa entre os 9% e os 11%) deveria ser compensada em termos da contração, pela pressurização interna provocada pela expansão do gás usado na tecnologia Mucell. Todavia experimentalmente não se verificou está compensação. Esta constatação poderá ser devido às condições de processamento usados que por lado podem não ter permitido a expansão adequada do fluido super critico (Azoto neste caso) ou introdução de pouco material polimérico na cavidade comparativamente com o volume de Azoto, que permitisse compensar a diminuição das dimensões da peça.

Comparando os valores da contração e do peso da variável 10% deste, caso com o do PBT Branco, verificam-se valores muito próximos. Se colocarmos as percentagens do PBT Branco e do PBT Laranja

por ordem, ou seja, 7%-8%-9%-10%-11% verificamos uma diminuição linear no peso e um aumento na contração.

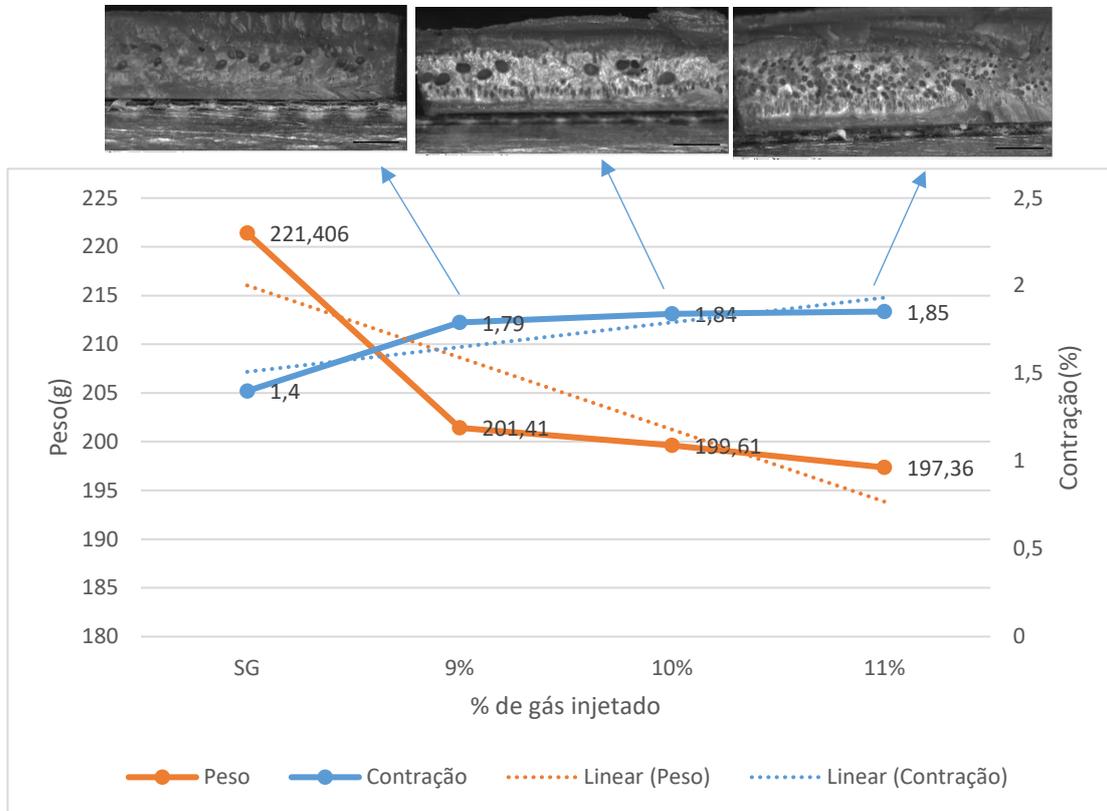


Figura 50- Análise do Peso do peso Vs Contração do PBT Laranja

No caso do PP verifica-se na Figura 51 que quando processamos as peças com *Mucell*, ou seja, quando injetamos gás juntamente com o material polimérico, ocorrem alterações a nível da contração e do peso da peça. Observando a linha azul que correspondente á contração, verifica-se um aumento apenas de 1mm dos 7% para os 9% e mais 1mm dos 9% para os 10%, que é bastante positivo uma vez que o objetivo é que a peça contraia o menos possível, no entanto é visível a tendência de aumentar com o aumento da percentagem de gás.

Referente á linha laranja, correspondente ao peso da peça, visualiza-se uma diminuição linear com o aumento da percentagem de gás, o que seria previsto. Esta diminuição ronda entre os 7% e os 10% de economia de peso.

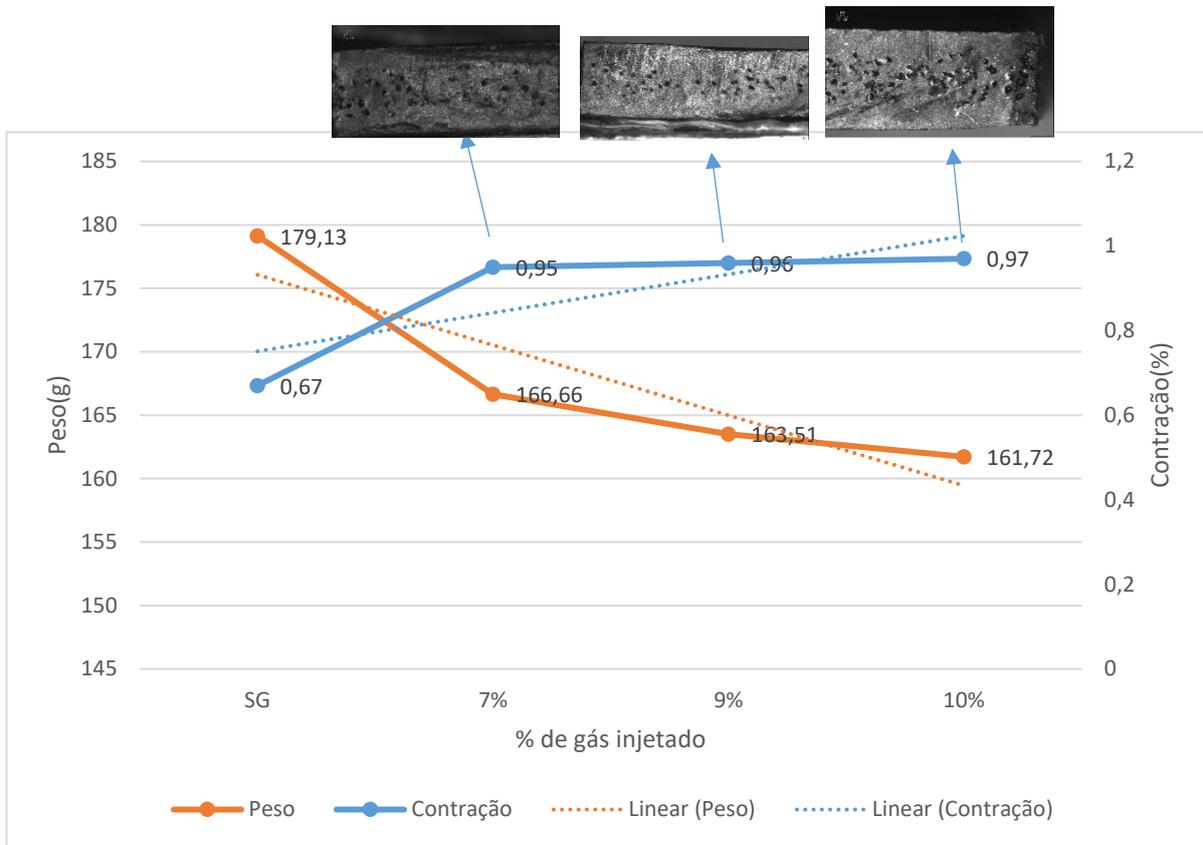


Figura 51- Análise do Peso do peso Vs Contração do PP Preto

CAPÍTULO 5 - Conclusão

O recurso á tecnologia *MuCell* é bastante vantajoso, uma vez que permite trabalhar com diferentes materiais poliméricos, diminui significativamente o ciclo de moldação, reduz o peso das peças e consegue-se obter peças plásticas com geometrias complexas, tudo isto se resume em ganhos económicos

Foi possível observar nos materiais estudados (PBT e PP) que o tempo de ciclo foi bastante reduzido entre os 32% e os 37% com a injeção de gás (Azoto). Ao injetar gás e com o aumento progressivo da sua percentagem, pode ocorrer um aumento de contração do material com a diminuição do peso da peça se o processo não for convenientemente otimizado e/ou a diminuição da massa a injetar não for convenientemente compensada com a pressão interna causada pelo fluido super critico. Obteve-se uma redução máxima no peso das peças para o material PBT de 11% e para o as peças injetas com PP uma redução máxima de 10%. Observou-se a existência de bolhas no núcleo das peças, que aumentam, naturalmente com o aumento da percentagem de gás, o que levam á diminuição do peso da peça e a uma perda das propriedades mecânicas.

No que diz respeito às propriedades mecânicas determinou-se os valores do módulo de elasticidade para os diferentes materiais processados com e sem *MuCell*. Estes apresentaram uma diminuição das propriedades mecânicas com o aumento da percentagem de azoto. A orientação do fluxo (longitudinal e transversal) de injeção nas peças injetadas, tem naturalmente influência na resistência mecânicas tal, como se comprovou. Verificou-se que as propriedades mecânicas dos materiais processados com e sem gás na direção paralela ao fluxo (longitudinal), são superiores as dos materiais processados na direção perpendicular (transversal) ao fluxo.

Em suma, torna-se vantajoso injetar com *MuCell* tendo em conta que se consegue poupar tempo e material, uma vez que são duas coisas essenciais na indústria dos polímeros. Apesar de ser mais aconselhável para peças que não exigem grandes propriedades mecânicas e que não sejam para aplicações estéticas.

Referências Bibliográficas

- [1] A. . Cunha, “Manual do Projetista para Moldes de Injeção de Plásticos Vol2. – Moldação por injeção e materiais plásticos”, Centimfe. 2003.
- [2] Cunha A. “Manual do Projetista para Moldes de Injeção de Plásticos Vol2. – Moldação por injeção e materiais plásticos”. Centimfe. 2003. .
- [3] Z. Zhang, “A study of ultra-high-molecular-weight polyethylene,” Laval, 2001.
- [4] R. Hansen, *Handbook of polymeric foams and foam technology*, Daniel Klempner and Kurt C. Frisch, eds., Hanser Publishers, Munich, Germany, 1992, 442 pp., vol. 31, no. 5. 1993.
- [5] D. EAVES, *Handbook of Polymer Foams*, Shawbury, Rapra Technology Limited. 2004.
- [6] P. RODRÍGUEZ and M. ÀNGEL, “Propiedades Térmicas y Mecánicas de Espumas de Poliolefinas,” Universidad de Valladolid, 1998.
- [7] M. G. d. Almeida, “Incorporacao de Polietileno Pos-Consumo em Espumas de Polietileno de Baixa Densidade,” Universidade de Caxias do Sul, 2006.
- [8] N. MILLS, *Polymer Foams Handbook, Engineering and Biomechanics Applications and Design Guide*, Elsevier. oxford, 2007.
- [9] J. F. Gómez-Gómez, “Caracterización y estudio comparativo de materiales celulares poliméricos obtenidos mediante moldeo por inyección con espumación física o química,” [Online]. Available: <http://www.tdx.cat/handle/10803/129171>.
- [10] Z. Xi, X. Sha, T. Liu, and L. Zhao, “Microcellular injection molding of polypropylene and glass fiber composites with supercritical nitrogen,” *J. Cell. Plast.*, vol. 50, no. 5, pp. 489–505, 2014, doi: 10.1177/0021955X14528931.
- [11] A. Rojas, “Caracterización de polipropileno con fibra de vidrio y policarbonato/acrilonitrilo butadieno estireno microespumados mediante moldeo por inyección MuCell®,” Escola Tècnica Superior d’Enginyeria Industrial de Barcelona - Enginyeria Industrial, 2013.
- [12] “Fluido Super Crítico(25 de Março de 2021). Retirado de <http://www.agronex.ufba.br/fluido.html>.” .
- [13] G. Llewelyn, A. Rees, C. A. Griffiths, and S. G. Scholz, “Advances in microcellular injection moulding,” *J. Cell. Plast.*, vol. 56, no. 6, pp. 646–674, 2020, doi:

- 10.1177/0021955X20912207.
- [14] “OKAMOTO, Kelvin T., *Microcellular Processing*, Hanser Gardner Publications, 2003, 186 p., ISBN 1-56990-344-1.”
- [15] “Microcellular Foaming Technology For Injection Industry (15 de Fevereiro de 2021). Retirado de <https://trexel.com/wp-content/uploads/2019/08/Brochure-Corporate-1.pdf>.” .
- [16] H. Wu and E. Wintermantel, “The effects of Mold Design on the Pore Morphology of Polymers Produced with MuCell® Technology,” *Journal of Cellular Plastics*, vol. 46, n° MuCell® Technology, pp. 519-529, 2010.”
- [17] “TREXEL INC, MuCell® Processes, ‘ Presentation Introduction For MuCell® Training’.”
- [18] M. Febra, “Processamento e Caracterização de Placas processadas com Tecnologia MuCell®,” *Dissertação de Mestrado, Escola Superior de Tecnologia e Gestão, instituto politécnico de Leiria*, 2015.
- [19] “MuCell® Foam Injection Moulding-Considerações sobre design de peças plásticas para moldação por injeção com o processo MuCell®(19 de Abril de 2021) Retirado de https://www.simulflow.pt/wp-content/uploads/2019/10/MuCell__PT_v1.pdf.” .
- [20] A. Oprea-Kiss and I. Kiss, “About the numerous cost and processing advantages of the microcellular foam injection molding process for thermoplastics materials in the automobile industry,” *Analecta Tech. Szeged.*, vol. 9, no. 2, pp. 6–14, 2015, doi: 10.14232/analecta.2015.2.6-14.
- [21] H. Guanghong and W. Yue, “Microcellular Foam Injection Molding Process,” no. March 2012, 2015, doi: 10.5772/34513.
- [22] *D. F. Baldwin, D. E. Tate, C. B. Park, S. W. Cha, N. P. Suh, Microcellular plastics processing technology, J. Japan Soc. Polym. Process, 6, (1994), pp. 187-256. .*
- [23] *L. S. Turing, H. Kharbas, A novel microcellular co-injection molding process, Proc. ANTEC, (2004), pp. 535-539. .*
- [24] *S. C. Chen, R. P. Yang, Y. W. Lin, P. S. Hsu, S. S. Hwang: Study on pressure control device to improve foaming uniformity for the injection molding microcellular foaming process, Proc. ANTEC, pp. 699–703, 2007. .*
- [25] “Poli(tereftalato de butileno) (30 de junho de 2021). Retirado de <https://www.resinex.pt/tipos-de-polimeros/pbt.html>.” .
- [26] “Poli(tereftalato de butileno) (PBT) (30 de junho de 2021). Retirado de <https://www.tudosobreplasticos.com/materiais/pbt.asp>.” .

- [27] “PP - POLIPROPILENO(30 de Junho de 2021) Retirado de <https://www.resinex.pt/tipos-de-polimeros/pp.html>.” .
- [28] *Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, “MATERIAIS POLIMÉRICOS,” ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, São Paulo, 2005. .*
- [29] *American Society for Testing and Materials, “Standard Test for Tensile Properties of Plastic,” em Annual Book of ASTM, 1980, p. Part 35. .*

Anexo 1. Tabelas com os valores da contração

| Nº da cota | Localização | Eixo | Nominal | Tol.1 | Tol.2 | Equipamenti | Crítico | Observações | 1 | 2 | 3 | 30 | Milj | Ma | Ran | Xq |
|-----------------------|-------------|------|---------|-------|-------|-------------|---------|-----------------------------|--------|--------|--------|----|--------|--------|------|--------|
| Peças Pretas | | 20 | 190,00 | | | 2 | R | | 188,17 | 188,13 | 188,13 | | 188,13 | 188,17 | 0,04 | 188,14 |
| | | 20 | 129,00 | | | 2 | R | 10%PP | 127,97 | 127,96 | 128,02 | | 127,96 | 128,02 | 0,06 | 127,98 |
| | | 20 | 190,00 | | | 2 | R | 7%PP | 188,17 | 188,19 | 188,18 | | 188,17 | 188,19 | 0,02 | 188,18 |
| | | 20 | 129,00 | | | 2 | R | 7%PP | 128,02 | 128,05 | 127,98 | | 127,98 | 128,05 | 0,07 | 128,02 |
| | | 20 | 190,00 | | | 2 | R | 3%PP | 188,15 | 188,19 | 188,15 | | 188,15 | 188,19 | 0,04 | 188,16 |
| | | 20 | 129,00 | | | 2 | R | 3%PP | 128,01 | 128,02 | 127,98 | | 127,98 | 128,02 | 0,04 | 128,00 |
| Peças Brancas | | 20 | 190,00 | | | 2 | R | Com segunda Pressão Sem Gás | 188,73 | 188,73 | 188,70 | | 188,70 | 188,73 | 0,03 | 188,72 |
| | | 20 | 129,00 | | | 2 | R | Com segunda Pressão Sem Gás | 128,35 | 128,35 | 128,40 | | 128,35 | 128,40 | 0,05 | 128,37 |
| | | 20 | 190,00 | | | 2 | R | PBI Sem Gás | 187,37 | 187,39 | 187,38 | | 187,37 | 187,39 | 0,02 | 187,38 |
| | | 20 | 129,00 | | | 2 | R | PBI Sem Gás | 127,28 | 127,32 | 127,25 | | 127,25 | 127,32 | 0,07 | 127,28 |
| | | 20 | 190,00 | | | 2 | R | PBI 10% | 186,39 | 186,58 | 186,54 | | 186,39 | 186,58 | 0,19 | 186,50 |
| | | 20 | 129,00 | | | 2 | R | PBI 10% | 126,68 | 126,80 | 126,86 | | 126,68 | 126,86 | 0,18 | 126,78 |
| Peças Laranjas | | 20 | 190,00 | | | 2 | R | PBI 8% | 187,01 | 186,79 | 186,86 | | 186,79 | 187,01 | 0,22 | 186,89 |
| | | 20 | 129,00 | | | 2 | R | PBI 8% | 127,10 | 126,89 | 126,98 | | 126,89 | 127,10 | 0,21 | 126,99 |
| | | 20 | 190,00 | | | 2 | R | PBI 7% | 186,94 | 186,90 | 186,91 | | 186,90 | 186,94 | 0,04 | 186,92 |
| | | 20 | 129,00 | | | 2 | R | PBI 7% | 126,99 | 127,02 | 127,10 | | 126,99 | 127,10 | 0,11 | 127,04 |
| | | 20 | 190,00 | | | 2 | R | PBI Sem Gás | 187,18 | 187,41 | 187,41 | | 187,18 | 187,41 | 0,23 | 187,33 |
| | | 20 | 129,00 | | | 2 | R | PBI Sem Gás | 127,29 | 127,30 | 127,29 | | 127,29 | 127,30 | 0,01 | 127,29 |
| Peças Laranjas | | 20 | 190,00 | | | 2 | R | 10% | 186,43 | 186,46 | 186,56 | | 186,43 | 186,56 | 0,13 | 186,48 |
| | | 20 | 129,00 | | | 2 | R | 10% | 126,73 | 126,69 | 126,68 | | 126,68 | 126,73 | 0,05 | 126,70 |
| | | 20 | 190,00 | | | 2 | R | 11% | 186,42 | 186,53 | 186,51 | | 186,42 | 186,53 | 0,11 | 186,49 |
| | | 20 | 129,00 | | | 2 | R | 11% | 126,75 | 126,70 | 126,71 | | 126,70 | 126,75 | 0,05 | 126,72 |
| | | 20 | 190,00 | | | 2 | R | 9% | 186,50 | 186,72 | 186,56 | | 186,50 | 186,72 | 0,22 | 186,59 |
| | | 20 | 129,00 | | | 2 | R | 9% | 126,70 | 126,96 | 126,74 | | 126,70 | 126,96 | 0,26 | 126,80 |